

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS



PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Simulación y optimización del
captador de un secadero solar.

Leganés, abril 2012

TUTOR DE PROYECTO: Antonio Soria Verdugo

AUTOR: Ricardo López Martínez de Guereñu

AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto fin de carrera, así como el camino realizado hasta llegar a este punto, no habría sido posible sin el apoyo y ánimo de:

- Mis padres: gracias por todas las facilidades que me habéis dado todos estos años, gracias por los valores que me habéis inculcado desde pequeño: constancia y trabajo.
- Mi hermana: Por ser un ejemplo para mí y estar siempre dispuesta a prestarme ayuda y consejos.
- Mi tutor de proyecto: Antonio Soria Verdugo, gracias por motivarme para realizar este proyecto, estar siempre disponible para asesorarme desde la primera vez que coincidimos en 4º curso.
- Mis profesores: por haberme inculcado conocimientos, por haberme moldeado como estudiante y por el apoyo recibido.
- Mis compañeros y amigos de la universidad: gracias por los grandes momentos vividos y por todo lo que he aprendido de cada uno de vosotros.

Gracias a todos los que he citado, y a muchos otros que han permitido que llegue a este punto de mi vida con alegría y optimismo.

Ricardo López Martínez de Guereñu

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	- 4 -
ÍNDICE DE FIGURAS	- 6 -
ÍNDICE DE TABLAS	- 8 -
1 INTRODUCCIÓN	- 9 -
1.1 RESUMEN	- 9 -
1.2 TEORÍA DEL SECADO	- 10 -
2. COLECTOR SOLAR	- 15 -
2.1 CLASIFICACIÓN DE COLECTORES SOLARES DE AIRE	- 15 -
2.1.1 CAPTADORES SOLARES DE PLACA PLANA SIN CUBIERTA	- 16 -
2.1.2 CAPTADORES SOLARES DE PLACA PLANA CON CUBIERTA	- 17 -
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES SOLARES	- 21 -
2.2.1 SISTEMAS SOLARES ACTIVOS	- 21 -
2.2.2 SISTEMAS SOLARES PASIVOS	- 22 -
2.3 PARTES DE LOS SECADORES	- 24 -
2.4 FÍSICA DE LOS CAPTADORES	- 26 -
2.5 DESCRIPCIÓN DEL CAPTADOR	- 31 -
3 MODELO SIMULADO	- 33 -
3.1 MODELO NOMINAL CONVECCION FORZADA	- 35 -
3.1.1 ESTUDIO DE LA VELOCIDAD DE ENTRADA	- 50 -
3.1.2 ESTUDIO DEL FLUJO DE CALOR EN LA CARA INFERIOR	- 52 -
3.1.3 ESTUDIO DE LA GEOMETRÍA	- 53 -
3.1.4 ESTUDIO DEL MALLADO EN LA SOLUCIÓN	- 57 -
3.2 MODELO NOMINAL CONVECCION LIBRE	- 59 -
3.2.1 COMPARACIÓN INCLINACIÓN 15°, 30°, 45°	- 72 -
4. EL PAPEL DE LA RADIACIÓN SOLAR	- 81 -
4.1 EL SOL	- 81 -
4.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SOL	- 82 -
4.1.2 MOVIMIENTOS DEL SOL	- 83 -
4.1.3 POSICIÓN SOLAR	- 83 -
4.1.3.1. DISTANCIA SOL-TIERRA	- 83 -
4.1.3.2. DECLINACIÓN	- 84 -
4.1.3.3. ÁNGULO HORARIO, ω	- 86 -

4.1.3.4 ALTURA SOLAR, α	- 87 -
4.1.3.5 ÁNGULO AZIMUTAL, γ_s	- 89 -
4.1.3.6 ÁNGULO DE SALIDA Y PUESTA DEL SOL, ω_{sh}	- 89 -
4.1.3.7 DURACIÓN DEL DÍA	- 89 -
4.2 LA RADIACIÓN SOLAR	- 90 -
4.2.1 APROVECHAMIENTO DE LA RADIACIÓN SOLAR	- 91 -
4.2.1.1 RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL	- 91 -
4.2.1.2 RADIACIÓN SOLAR SOBRE UN PLANO INCLINADO	- 93 -
4.2.1.3 ENERGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS CAPTADORES A 15, 30 y 45° TENEINDO EN CUENTA LOS MOVIMIENTOS DEL SOL.	- 97 -
5 CONCLUSIONES	- 101 -
6 BIBLIOGRAFÍA	- 104 -

ÍNDICE DE FIGURAS

- 1.Figura 1.1 Diagrama psicométrico. Evolución del aire en los procesos de secado.	- 13 -
- 2.Figura 2.1. Captador solar de aire de placa plana sin cubierta.	- 16 -
- 3.Figura 2.2 Captador solar de aire de placa plana con cubierta de paso superior.	- 18 -
- 4.Figura 2.3 Captador solar de aire de placa plana con cubierta de paso inferior.	- 18 -
- 5.Figura 2.4 Captador solar de aire de placa plana suspendida de simple paso.	- 19 -
- 6.Figura 2.5 Captador solar de aire de placa plana suspendida de doble paso.	- 20 -
- 7.Figura 2.6 Captador solar de aire de placa plana perforada.	- 21 -
- 8.Figura 2.7 Secadero solar pasivo distribuido.	- 26 -
- 9.Figura 2.8 Componentes de un colector solar plano de líquido.	- 32 -
- 10.Figura 3.1 Vista isométrica de la geometría del modelo simulado.	- 33 -
- 11.Figura 3.2 Mallado del modelo, perspectiva isométrica.	- 34 -
- 12.Figura 3.3 Mallado del modelo, vista frontal.	- 35 -
- 13.Figura 3.4 Colocación de los 15 planos perpendiculares al flujo.	- 36 -
- 14.Figura 3.5 Colocación de los 15 planos perpendiculares al flujo más el eje de simetría.	- 37 -
- 15.Figura 3.6 Representación del Reynolds a lo largo del captador.	- 38 -
- 16.Figura 3.7 Comparación flujo Turbulento vs Flujo Laminar.	- 39 -
- 17.Figura 3.8 Error relativo Flujo Turbulento vs Flujo Laminar.	- 40 -
- 18.Figura 3.9 Velocidades en forma de vector.	- 41 -
- 19.Figura 3.10 Velocidades medias.	- 42 -
- 20.Figura 3.11 Balance energético.	- 43 -
- 21.Figura 3.12 Temperaturas.	- 45 -
- 22.Figura 3.13 Temperaturas (2).	- 46 -
- 23.Figura 3.14: Temperatura medias primer orden y segundo orden.	- 47 -
- 24.Figura 3.15 Densidades.	- 48 -
- 25.Figura 3.16 Densidad de la corriente.	- 49 -
- 26.Figura 3.17 Gasto medio de la corriente.	- 50 -
- 27.Figura 3.18 Estudio según la velocidad de entrada.	- 51 -
- 28.Figura 3.19: Estudio según el flujo de calor.	- 52 -
- 29.Figura 3.20 Estudio según la altura b del captador.	- 54 -
- 30.Figura 3.21 Placa caliente intermedia Vs Placa caliente abajo.	- 55 -
- 31.Figura 3.22 Estudio de temperaturas. Placa caliente intermedia.	- 56 -
- 32.Figura 3.23 Estudio de temperaturas. Placa caliente abajo.	- 57 -
- 33.Figura 3.24 Comparación malla refinada y sin refinar.	- 58 -
- 34.Figura 3.25 Comparación malla refinada y sin refinar (2).	- 59 -
- 35.Figura 3.26 Temperatura de salida de la corriente en función del flujo de calor en la cara inferior.	- 61 -
- 36.Figura 3.27 Vista superior del captador para una inclinación de 15°.	- 62 -
- 37.Figura 3.28 Vista lateral del captador para una inclinación de 15°.	- 62 -
- 38.Figura 3.29 Distribución de temperaturas de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =15°.	- 63 -
- 39.Figura 3.30 Distribución de velocidades de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =15°.	- 64 -
- 40.Figura 3.31 Vista superior del captador para una inclinación de 30°.	- 65 -
- 41.Figura 3.32 Vista lateral del captador para una inclinación de 30°.	- 66 -
- 42.Figura 3.33 Distribución de temperaturas de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =30°.	- 67 -
- 43.Figura 3.34 Distribución de velocidades de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =30°.	- 68 -
- 44.Figura 3.35 Vista superior del captador para una inclinación de 45°.	- 69 -
- 45.Figura 3.36 Vista lateral del captador para una inclinación de 45°.	- 70 -
- 46.Figura 3.37 Distribución de temperaturas de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =45°.	- 71 -

- 47.Figura 3.38 Distribución de velocidades de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =45°.	- 72 -
- 48.Figura 3.39 Comparación de la distribución de temperaturas para las 3 inclinaciones.	- 74 -
- 49.Figura 3.40 Comparación de temperaturas medias para las 3 inclinaciones.	- 75 -
- 50.Figura 3.41 Comparación de velocidades medias para las 3 inclinaciones.	- 76 -
- 51.Figura 3.42 Perfil de temperaturas a la salida del captador solar.	- 77 -
- 52.Figura 3.43 Perfil de velocidades a la salida del captador solar.	- 78 -
- 53.Figura 4.1 Distancia Sol-Tierra diaria.	- 84 -
- 54.Figura 4.2 Declinación solar diaria.	- 85 -
- 55.Figura 4.3 Concepto de masa de aire.	- 86 -
- 56.Figura 4.4 Ángulo horario.	- 87 -
- 57.Figura 4.5 Altura solar en primavera, verano, otoño e invierno.	- 88 -
- 58.Figura 4.6: Duración horaria del día para la latitud correspondiente a Leganés.	- 90 -
- 59.Figura 4.7: Distribución espectral de la radiación solar y de un cuerpo negro a 6000K.	- 90 -
- 60.Figura 4.8 Radiación global sobre la superficie horizontal a lo largo del día.	- 92 -
- 61.Figura 4.9 Radiación global sobre la superficie horizontal a lo largo del año.	- 93 -
- 62.Figura 4.10 Influencia de la inclinación sobre la radiación durante un día de verano (16 de Junio).	- 94 -
- 63.Figura 4.11 Influencia de la inclinación sobre la radiación global durante un día de invierno (18 de Diciembre).	- 95 -
- 64.Figura 4.12 Influencia de la inclinación sobre la radiación directa durante un día de invierno (18 de Diciembre).	- 96 -
- 65.Figura 4.13 Irradiación en el plano horizontal (punteado en negro) vs inclinación 15° en azul.	- 98 -
- 66.Figura 4.14 Irradiación en el plano horizontal (punteado en negro) vs inclinación 30° en azul.	- 98 -
- 67.Figura 4.15 Irradiación en el plano horizontal (punteado en negro) vs inclinación 45° en azul.	- 99 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:2.1 Sistemas solares pasivos.	- 24 -
Tabla 2:3.1 Estudio de la temperatura a la salida con un flujo de calor de 1000W/m^2 .	- 52 -
Tabla 3: 3.2 Estudio de la temperatura de salida a una velocidad de entrada de 1 m/s.	- 53 -
Tabla 4: 3.3 Estudio de la temperatura de salida a una velocidad de entrada de 1m/s y 1000 W/m -	54 -
Tabla 5: 3.4 Obtención del calor útil y del rendimiento a la salida del captador para una inclinación de 15°.	- 78 -
Tabla 6: 3.5 Obtención del calor útil y del rendimiento a la salida del captador para una inclinación de 30°.	- 79 -
Tabla 7:3.6. Obtención del calor útil y del rendimiento a la salida del captador para una inclinación de 45°.	- 79 -
Tabla 8: 3.7 Calor útil y rendimiento para la malla refinada de las 3 configuraciones.	- 80 -
Tabla 9: 4.1 Clasificación estelar en base a su temperatura.	- 82 -
Tabla 10: 4.2 Clasificación estelar en base a su luminosidad.	- 82 -
Tabla 11: 4.3 Características físicas del Sol y la Tierra.	- 82 -
Tabla 12: 3.7 Calor útil y rendimiento para la malla refinada de las 3 configuraciones.	- 97 -
Tabla 13: 4.4 Calor útil y rendimiento para la malla refinada para las 3 configuraciones.	- 99 -

1 INTRODUCCIÓN

Los secaderos solares son sistemas que permiten la transformación de la energía proveniente de los rayos solares, en energía térmica aplicable a diversos procesos. Normalmente se utiliza para secar alimentos aunque la utilización del flujo de aire calentado por el sol puede ser usado para secar hierbas aromáticas, secar maderas y cáscaras, secar especias como la pimienta y para muchos otros procesos industriales.

Debido a la escasez de recursos fósiles y al incremento de la contaminación atmosférica se ha puesto de manifiesto la necesidad de aprovechar los recursos energéticos de una manera limpia y eficaz. El aprovechamiento de la energía térmica solar repercute en el ahorro de combustibles fósiles, aunque en muchos secaderos solares se utilizan sistemas auxiliares como el de la colocación de pequeñas calderas para la utilización del secadero tanto en días nublados como por las noches.

Aunque se utilicen sistemas auxiliares que emiten CO_2 por el hecho de que se produce una combustión, siempre se producirá un ahorro, ya que el secadero funciona con la misma filosofía que un colector solar colocado en el tejado de una vivienda para la obtención de agua caliente sanitaria. En estos sistemas, aunque se utilice una caldera auxiliar, ésta trabaja menos y gasta menos combustible porque el agua que se lleva a los tanques de almacenamiento desde el colector solar es agua precalentada, que aunque no llegue a las exigencias que pide el consumidor, hace que solo haya que calentarla desde la temperatura de los tanques a la que pide el consumidor, y no desde la temperatura del agua de red hasta la que demanda el consumidor.

En el presente proyecto se estudiarán por separado dos modos distintos de funcionamiento del captador solar. Por un lado, se realizarán simulaciones en Fluent del captador solar con un medio de impulsión que puede ser un ventilador. También se estudiará y se realizarán simulaciones sin la utilización de un ventilador, de modo que los movimientos del aire sean provocados por la diferencia de densidades. Para cada modelo se realizarán varias simulaciones cambiando el flujo de calor entrante, velocidad de entrada y geometría en convección forzada y en convección natural se estudiará la repercusión que tiene el ángulo de inclinación del colector solar.

1.1 RESUMEN

Los primeros trabajos en el campo de los secadores solares se remontan a 1940, pero el estudio teórico y experimental tiene su despunte en los años 60. Desde entonces se han construido e implementado multitud de ellos, pero desde el punto de vista constructivo tienen una cierta similitud: todos ellos tienen un captador solar que tiene una superficie que varía según la aplicación del sistema unido a una cámara de secado convenientemente aislada.

El objetivo del secado es el de reducir la humedad de un producto, introduciéndolo en el secadero de modo que sus propiedades cambien transcurrido un tiempo. La deshidratación es una técnica utilizada desde la antigüedad para la conserva de alimentos. Actualmente esta técnica utiliza altos consumos de energía y dicha operación puede realizarse de 3 formas diferentes:

- Por evaporación con ayuda de calor, que es la que se va a estudiar.
- Mediante procesos físico-químicos (osmosis, adsorción)
- Por extracción de agua con métodos mecánicos (presión, filtrado, centrifugación, etc).

El principal objetivo cuando se adquiere un secadero solar es el de hallar la superficie de absorbedor que maximiza el rendimiento del secador, junto con el de acertar en los materiales utilizados de manera que el coste no sea elevado mientras que el rendimiento si lo sea.

Los dos elementos que componen un secadero solar son el colector, donde el fluido calo transportador es el aire y va aumentando la temperatura a medida que avanza hasta la segunda parte, la cámara de secado, donde los productor que hemos elegido se deshidratan debido a la interacción con el aire caliente que se ha obtenido previamente. Ambos elementos se pueden construir de diferentes formas, y cada diseño responde a las necesidades de cada problema a resolver.

1.2 TEORÍA DEL SECADO

La realización del proyecto se centra en la simulación del flujo interno que se desarrolla en el interior del colector solar. El aire caliente obtenido del colector tiene la finalidad de deshidratar, secar o calentar.

El secado térmico es la forma más habitual de secar subproductos y se realiza mediante una transferencia de masa y de energía en el mismo proceso:

- Transferencia de energía: el calor tiene la dirección desde el agente desecante (aire, al que queremos secar) al producto que se quiere deshidratar.
- Transferencia de masa: se encarga de llevar la humedad desde el interior del producto hasta la superficie, y desde la superficie hasta el aire de alrededor.

Es importante destacar que las condiciones físicas del producto evolucionan a lo largo del tiempo, ya que el producto va perdiendo humedad. Además el secado depende del producto a secar; si está húmedo solo por la superficie, la corriente de fluido solo necesita la evaporación superficial mientras que si la humedad se halla en el interior, el

secado está influido por fenómenos como la capilaridad, difusión de vapor y el flujo de moléculas.

Los principales objetivos que se persiguen con el secado son:

- La utilización del fluido caliente para un proceso industrial.
- Mejorar el rendimiento de una instalación o equipo.
- Reducir costes (como pueden ser de almacenamiento por la reducción de espacio y de transporte por la reducción de masa).
- Beneficios medioambientales.

Un ejemplo es que la utilización de combustibles con humedades entre un 35 y un 70% en base húmeda hacen variar la eficiencia del sistema entre un 50 y un 75 % y el tamaño de los equipos puede variar entre 1.2 y 2.2 veces dependiendo si el combustible está completamente seco o no lo está.

Otro ejemplo es el aumento en la temperatura de llama en la combustión, ya que no se pierde calor en la combustión para evaporar el agua en el combustible. Con un combustible húmedo la temperatura de llama en la combustión se puede reducir de un 10 a un 40%. El aumento de la temperatura de llama en la combustión produce beneficios como los siguientes:

- Se mejora el gradiente de temperatura en la caldera para la transferencia de calor. Al mejorar la transferencia de calor para la misma sección de tubos permite calentar el fluido hasta llegar a temperaturas más altas. O mirándolo desde otro punto de vista, se reduce el área mínima de transferencia para la obtención de una corriente de aire caliente deseada, reduciéndose así el tamaño de la caldera y los costes de adquisición de ésta.
- Se produce una combustión más completa, reduciéndose inquemados sólidos y gaseosos (CO, cenizas, etc).
- Con la mejora de la combustión se reduce el exceso de aire necesario, reduciéndose los inquemados, disminuyendo la cantidad de calor a emplear para calentar el aire, descenso de la potencia necesaria para los ventiladores, etc.

Debido a estos beneficios en la combustión, siempre es recomendable realizar un proceso de secado para la utilización de biomasa como combustible en calderas, desde el punto de vista termodinámico.

Evoluciones típicas del aire en un proceso de secado:

Como se ha comentado, el secado es un proceso que persigue la extracción de humedad del producto que queremos deshidratar y que se puede hacer por el contacto de una corriente de aire (natural o forzada) y a una temperatura ambiente o precalentada.

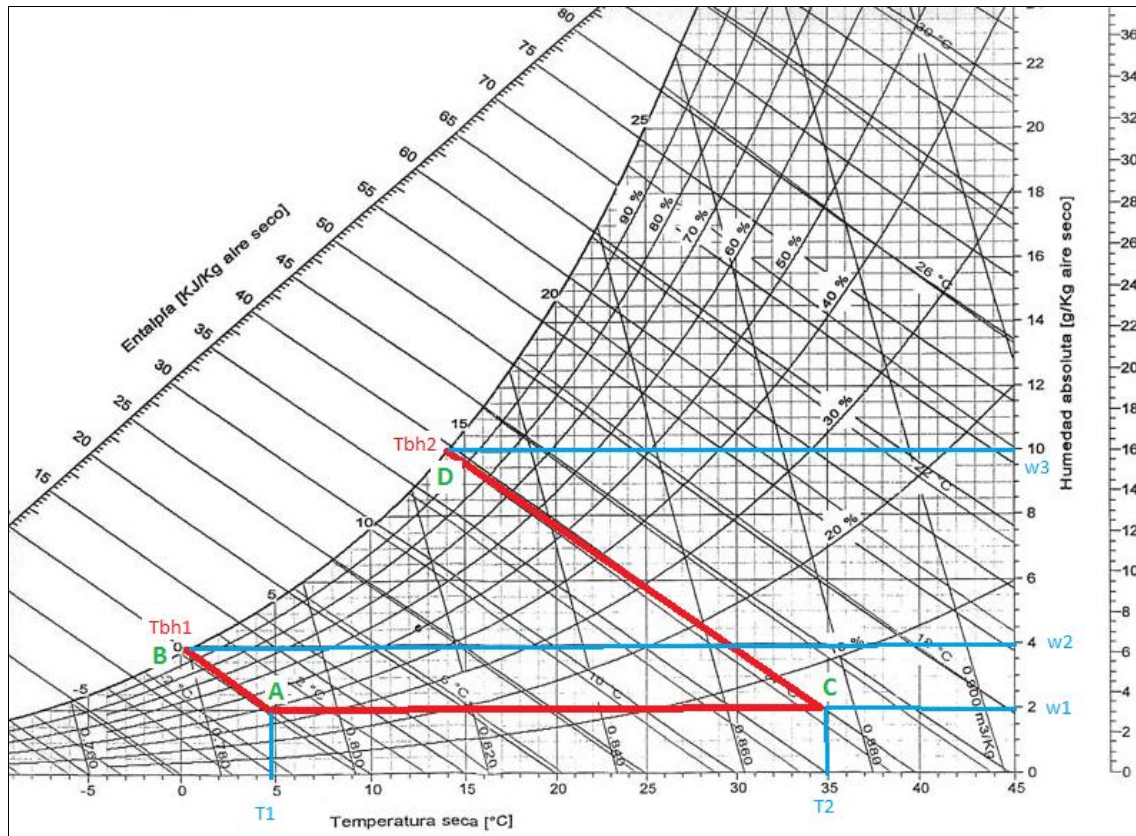
El proceso de secado produce una transferencia de calor desde el aire caliente hasta el producto que se encuentra en el secadero que permite la vaporización de la humedad del producto y una transferencia de masa desde ese producto hasta la corriente de aire. La corriente de aire incrementa su humedad relativa y disminuye su temperatura seca, a una constante temperatura de bulbo húmedo como se puede observar en la figura 1.1 en la evolución de A a B.

Si se utiliza aire precalentado, se optimiza el proceso de secado, ya que el aire a una mayor temperatura permite un mayor arrastre de humedad. Este hecho se puede comprobar en la figura 1.1.

Imaginemos una situación en la que se quiere secar un producto en un ambiente frío, como puede ser secar unos trozos de leña en un día de otoño en Salamanca para tener leña preparada y en óptimas condiciones para el duro invierno.

La corriente de aire que se puede aprovechar es la del aire ambiente que se encuentra a $T_1 = 5^\circ \text{C}$ aproximadamente a una humedad relativa del 40 % y a una temperatura de bulbo húmedo de 0°C y a una humedad absoluta de $w_1 = 2 \text{ g/kg}$ aire seco, (punto A en la figura 1.1). Si el aire no es precalentado, evoluciona según una línea de enfriamiento adiabático (línea AB) y si el proceso evoluciona idealmente hasta saturación se obtiene una humedad absoluta de la corriente de aire de $w_2 = 4 \text{ g/kg}$ aire seco, que implica una extracción máxima de humedad de $(w_2 - w_1)$.

En cambio si se dispone de un secadero solar que aumente la temperatura hasta los $T_2 = 35^\circ \text{C}$ a humedad absoluta constante w_1 , con una humedad relativa de menos del 10 %, el proceso de secado corresponde con una línea de enfriamiento adiabática (línea CD en la figura 1.1) que llegando idealmente a saturación se alcanza una humedad absoluta de $w_3 = 10 \text{ g/kg}$ aire seco. Esta nueva corriente de aire tiene el valor añadido de poder extraer más humedad, $(w_3 - w_1)$.



- 1.Figura 1.1 Diagrama psicrométrico. Evolución del aire en los procesos de secado.

Se aprecia como un aumento de temperatura repercute de una manera muy importante en la capacidad de secado de una corriente. Por ello la utilización de secadores solares en procesos industriales o agrícolas repercuten en mejorar la eficiencia del proceso de secado, ya que la corriente de aire tendrá mayor capacidad de arrastre de humedad al aumentar su temperatura de funcionamiento gracias a la energía térmica solar.

Aclaraciones de conceptos utilizados:

- **Temperatura de bulbo húmedo:** es la temperatura que nos proporciona un termómetro a la sombra, con el bulbo rodeado de algodón húmedo bajo una corriente de aire. El agua al evaporarse absorbe calor de las cercanías y hace bajar la temperatura.
- **Humedad relativa:** cociente entre presión parcial de vapor de agua en la mezcla a una temperatura dada, p_v , y la presión de saturación a la misma temperatura p_{vs} :

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vS}} (\text{dec}) = \frac{P_v}{P_{vS}} \cdot 100(\%) \quad (1.1)$$

Nos permite cuantificar si el aire tiene o no capacidad de absorber más vapor de agua. Cuando alcanza el 100 % la corriente de aire no admite más vapor de agua sin condensar.

- **Humedad absoluta:** masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco. También se puede expresar en función de las presiones:

$$\omega = \frac{m_v}{m_{as}} = 0.62198 \cdot \frac{P_v}{P_T - P_v} \quad (1.2)$$

2. COLECTOR SOLAR

Los secadores solares se componen de un colector solar y una cámara de secado. Centrándonos en el colector solar, se puede decir que es la primera parte del secadero con la que interactúa el aire que es preciso calentar.

El colector solar se encarga de absorber la energía térmica procedente de los rayos solares en una placa metálica, generalmente de acero negro para absorber todas las longitudes de onda y de este modo incrementar lo máximo posible su temperatura. Previamente los rayos solares han atravesado otra parte del captador, que es una superficie de policarbonato transparente (u otro plástico con buenas propiedades térmicas y mecánicas). En los laterales se colocan superficies que se han elegido de madera en la implementación en Fluent, pero que en general deben ser aislantes.

Las dimensiones exteriores pueden variar mucho dependiendo de la aplicación que se quiere dar al sistema. Es lógico que cuanto más área haya, mayor calentamiento de la corriente de aire. En el modelo implementado la geometría es de 0.03m de altura por 0.5m de anchura por 1.5m de profundidad.

Es importante comentar que en el modelo implementado con poner en las condiciones de contorno que el flujo de calor a través de las superficies sea cero ya se consigue que se comporten como paredes adiabáticas (3 de ellas) mientras que la de abajo incorporará al flujo de aire 1000 W/m^2 . Esto no es tan sencillo en el modelo experimental, por lo que las paredes se recubren de material aislante para evitar que las pérdidas de calor sean altas en las superficies exteriores. Luego el modelo simulado es una situación ideal y la temperatura obtenida será más alta que la que se obtendría en el modelo experimental.

2.1 CLASIFICACIÓN DE COLECTORES SOLARES DE AIRE

Los colectores solares son sistemas encargados del aumento de la temperatura de la corriente de aire aprovechando la energía térmica del sol. Son sencillos de construir y de utilizar. Tienen muchas aplicaciones entre las que destacan su utilización en la deshidratación de alimentos, productos agrícolas y subproductos biomásicos para su utilización como combustibles para la obtención de energía térmica.

La parte más importante del colector solar es la placa absorbedora, que normalmente se confecciona de un material metálico (normalmente pintada de negro) para que absorba la mayor cantidad de energía térmica y la transmita al fluido de trabajo que normalmente será aire.

2. Colector solar

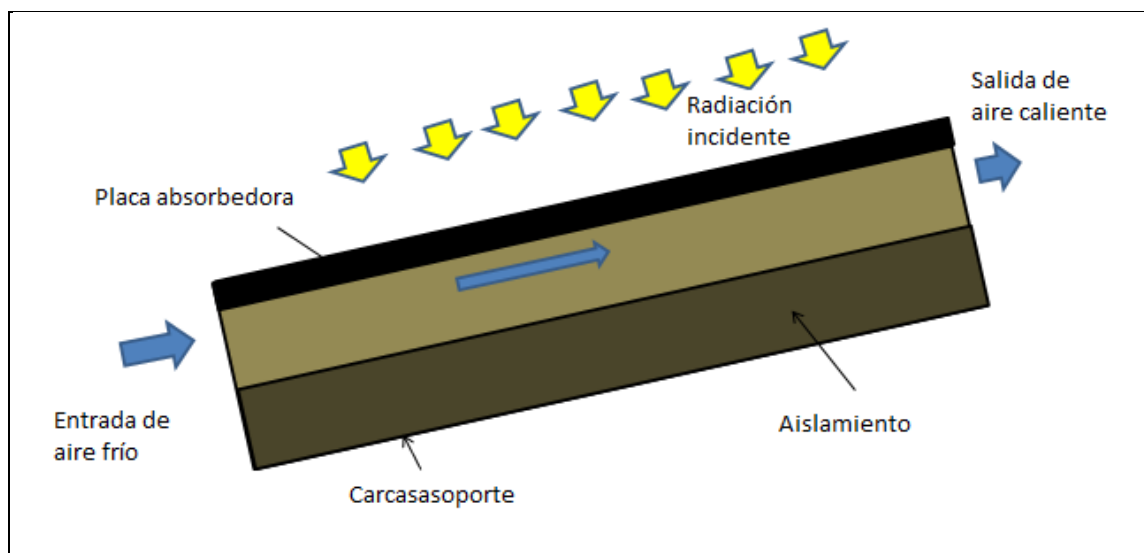
Como se puede observar en la figura 2.1 una parte muy importante del colector es el aislante, que se encarga de minimizar las pérdidas térmicas al exterior. Por ello se realizan con materiales con baja conductividad térmica.

Es imprescindible en la construcción del secadero solar conseguir una elevada eficiencia en el colector solar, ya que a mayor temperatura de salida, mayor capacidad de absorción de humedad tendrá la corriente de aire.

Una primera clasificación según el modo de absorber la energía térmica sería separar los calentadores de concentración con los de placa plana. Los calentadores de concentración consiguen temperaturas más elevadas ya que aprovechan mayor cantidad de energía térmica solar. Por otro lado son más caros y su mantenimiento es mayor. Además requieren un estudio más exhaustivo de la radiación solar. En general, las temperaturas de trabajo requeridas en las aplicaciones de secado (normalmente 10°C-40°C por encima de la temperatura ambiente) y se alcanzan en colectores solares de placa plana por lo que son más utilizados y son los que se va a estudiar en este proyecto.

2.1.1 CAPTADORES SOLARES DE PLACA PLANA SIN CUBIERTA

Estos captadores son los más simples y baratos del mercado. Consisten en una placa absorbedora, un conducto de aire y un espesor de aislamiento, figura 2.1 y la transferencia de calor desde la placa a alta temperatura hasta el aire se realiza por la parte inferior.



- 2.Figura 2.1. Captador solar de aire de placa plana sin cubierta.

Al no disponer de cubierta transparente no tienen pérdidas ópticas, sin embargo existen pérdidas térmicas muy elevadas por convección ya que la superficie caliente se

2. Colector solar

encuentra en contacto con el aire exterior (flujo externo). A medida que aumenta la temperatura de trabajo estas pérdidas serán mayores.

Por otro lado, pueden ser útiles si la temperatura que se necesita para la aplicación es una temperatura no mucho más elevada que la temperatura ambiente ($<10^{\circ}\text{C}$). De esta manera, su simplicidad y bajo coste pueden compensar a su menor rendimiento.

Se debe tener precaución a la hora de trabajar con ellos, ya que la parte más caliente del captador se encuentra fuera, y puede estar a elevadas temperaturas, por lo que si se toca, puede causar quemaduras.

2.1.2 CAPTADORES SOLARES DE PLACA PLANA CON CUBIERTA

El objetivo de la colocación de una cubierta es la de reducir las pérdidas térmicas que se producen por convección. Se construyen colocando una cubierta transparente de plástico resistente sobre la placa absorbadora y dejando espacio para la corriente de aire, que se produce entre cubierta y placa.

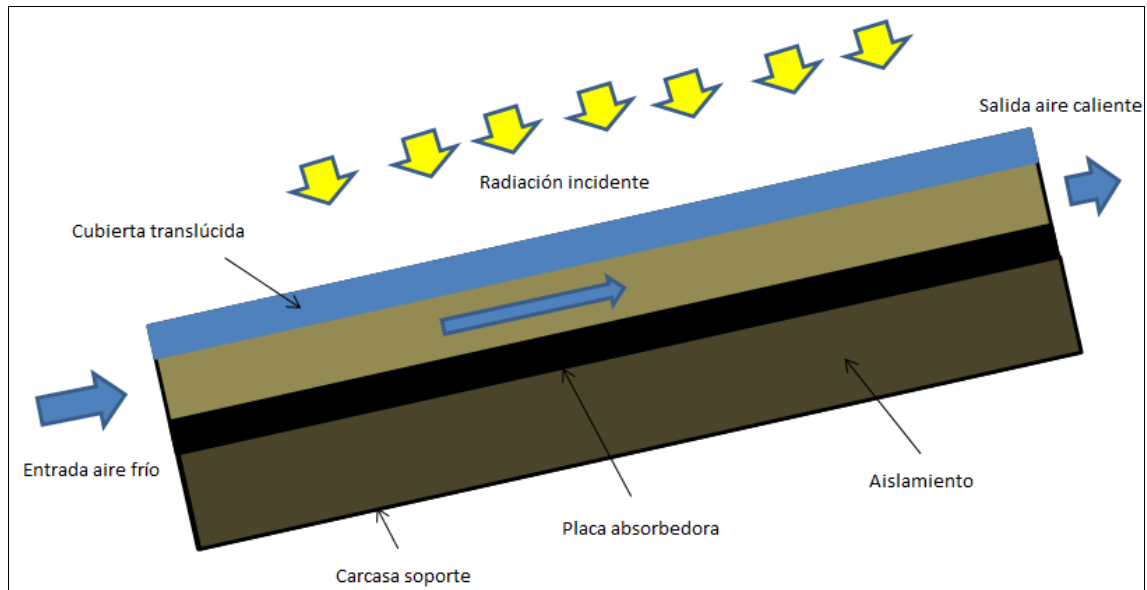
Además de la minimización de las pérdidas por convección es útil porque protege a los elementos interiores del captador. Por estos motivos se deben utilizar materiales que tengan buenas propiedades mecánicas y a la vez que permitan el paso de la radiación de onda corta del sol e impida la salida de la radiación de onda larga emitida por la placa absorbadora.

Los colectores solares planos con superficie absorbadora cubierta tienen una eficiencia mayor en general que los sistemas sin cubierta en procesos con moderadas elevaciones de temperatura. Por otro lado, presentan costes de construcción mayor y en algunas situaciones costes de mantenimiento más elevados (rotura de cubiertas, limpieza...).

1. Captadores de placa plana con cubierta y paso de aire superior.

Es la topología más sencilla dentro de los captadores con cubierta. El aire pasa entre la cubierta y la placa absorbadora, figura 2.2. La transferencia de calor se produce en la parte superior de la placa caliente.

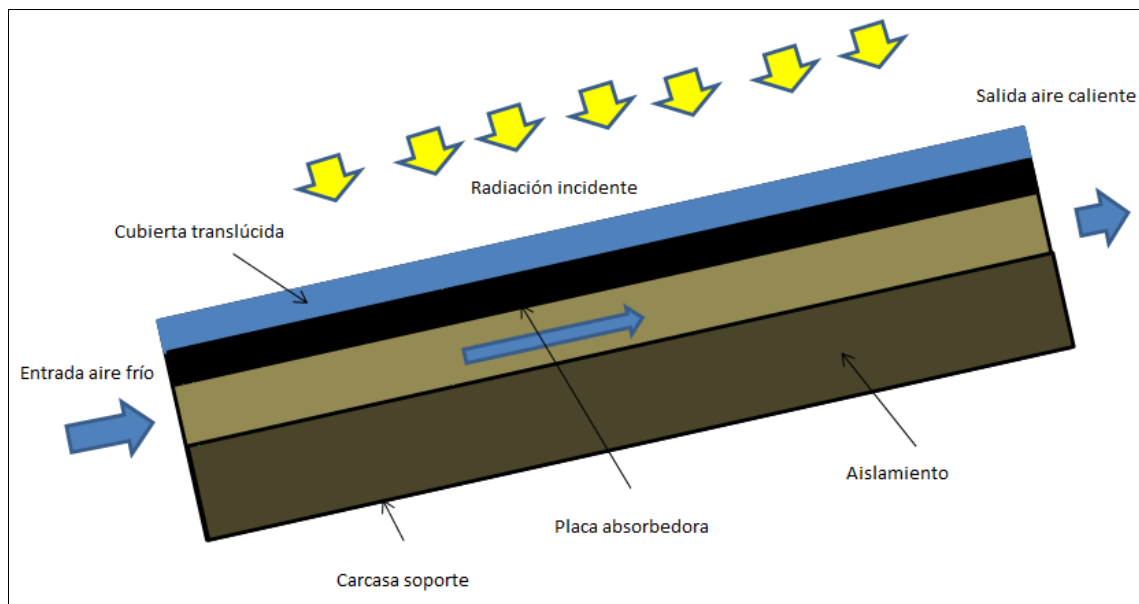
2. Colector solar



- 3.Figura 2.2 Captador solar de aire de placa plana con cubierta de paso superior.

2. Captadores de placa plana con cubierta y paso de aire inferior.

La placa absorbedora se coloca justo debajo de la cubierta (figura 2.3) existiendo una pequeña capa de aire estático entre ambas. El aire fluye entre la placa absorbedora y el aislamiento. La construcción es un poco más complicada pero el rendimiento en los captadores de paso inferior es generalmente más elevado que en paso superior.



- 4.Figura 2.3 Captador solar de aire de placa plana con cubierta de paso inferior.

En el mercado existen captadores en los que la placa absorbedora dispone además de aletas o está corrugada en V invertida. El objetivo es aumentar el área

2. Colector solar

de contacto con el aire para que se produzca una mayor transferencia de calor, aumentando el rendimiento del colector y disminuyendo el tiempo de secado.

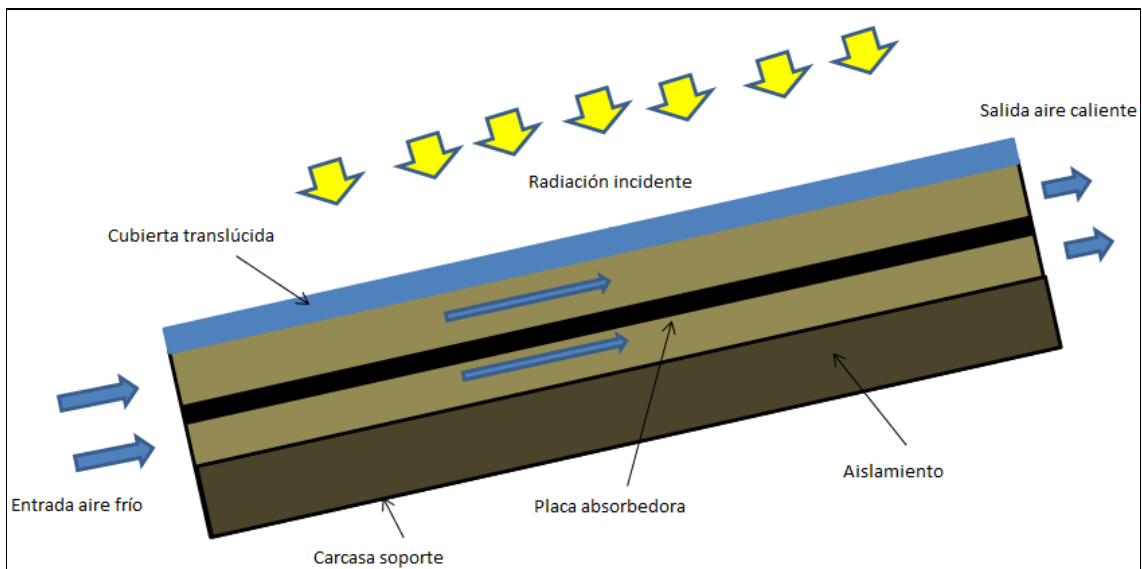
$$Q = h \cdot A \cdot (T_A - T_s) \quad (2.1)$$

Se puede comprobar mirando la ecuación de convección cómo la transferencia de calor es directamente proporcional al área de contacto entre el material caliente y el fluido de contacto.

3. Captadores de placa suspendida.

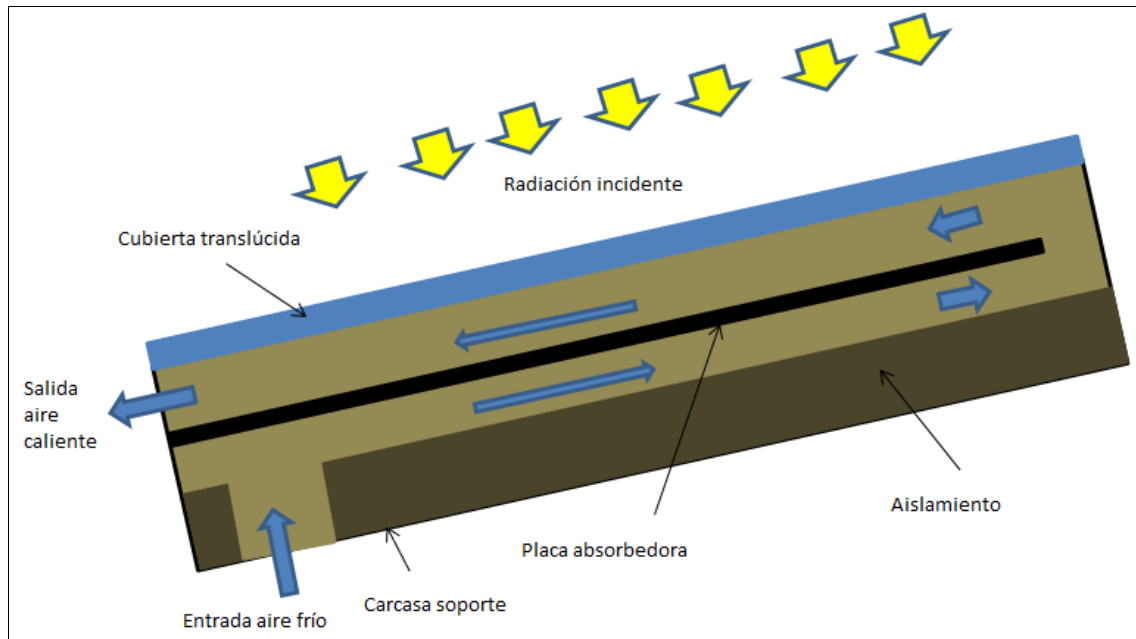
En estos modelos, la placa absorbidora se encuentra suspendida entre la cubierta translúcida y el aislamiento como se puede observar en las figuras 2.4 y 2.5. De esta manera, el fluido calo transportador circula por ambas caras de la placa absorbidora, multiplicando por dos la superficie de transferencia de calor. El rendimiento por este motivo es superior al de los captadores de placa plana de paso superior e inferior.

Existen dos geometrías predominantes que son las de simple paso con flujo paralelo (figura 2.4) y las de doble paso (figura 2.5).



- 5.Figura 2.4 Captador solar de aire de placa plana suspendida de simple paso.

2. Colector solar



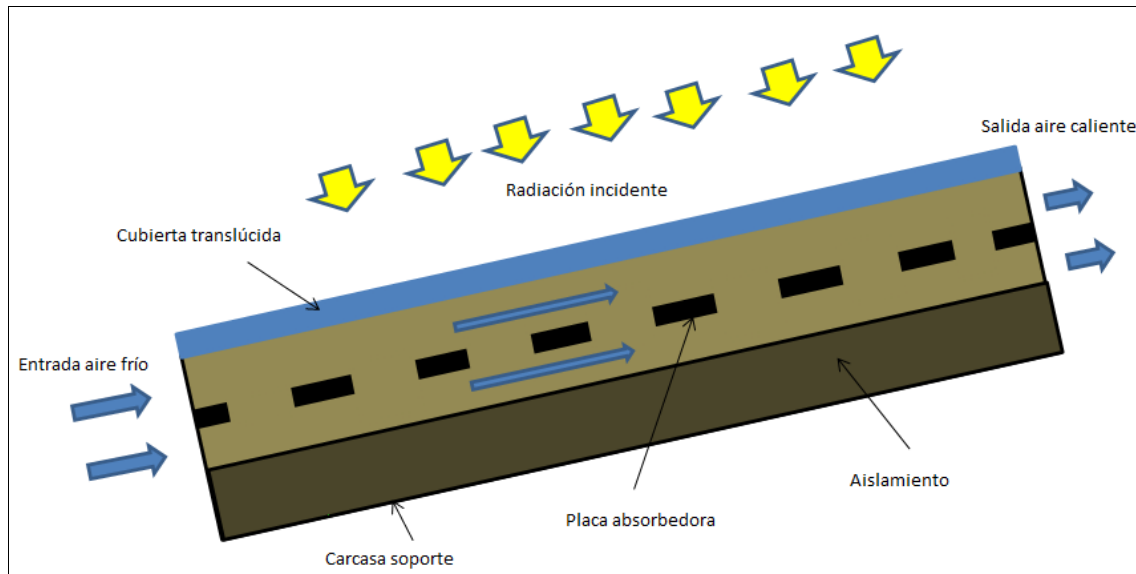
- 6.Figura 2.5 Captador solar de aire de placa plana suspendida de doble paso.

En la geometría de flujo paralelo, se tiene un área de paso que es el doble, pero el fluido interactúa con la placa absorbedora solo una vez, mientras que en geometría de doble paso, el gasto másico es aproximadamente la mitad puesto que el área de paso se divide entre 2, pero el fluido interactúa 2 veces con la placa absorbedora caliente. Es conveniente la impulsión mediante un elemento mecánico como puede ser un ventilador ya que si hay una inclinación, el fluido caliente se puede almacenar en la parte superior del captador por diferencias de densidades.

4. Captadores de placa perforada.

La geometría es idéntica a los captadores de placa suspendida de simple paso salvo que la placa dispone de cortes, por lo que no es continua. Por este motivo es más cara, debido a que la fabricación y construcción de este modelo es más complicada, pero el aumento de la transferencia de calor al fluido hace que aumente el rendimiento. Se puede observar la geometría de este modelo en la figura 2.6.

2. Colector solar



- 7.Figura 2.6 Captador solar de aire de placa plana perforada.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES SOLARES

Dentro de los secaderos de baja temperatura existen varias configuraciones posibles. Según la forma de circulación del fluido desecante se pueden clasificar en sistemas activos y sistemas pasivos:

2.2.1 SISTEMAS SOLARES ACTIVOS

Los sistemas solares activos o de convección forzada aprovechan la potencia que les suministra los ventiladores para mover mayor cantidad de aire que permitirá una mayor extracción de humedad. Pueden ser sistemas todo solar en los que toda la energía térmica se obtiene del sol o híbridos en los que además de la radiación solar aprovechan el calor que les suministra una fuente de energía exterior. Esto es muy útil cuando se quiere obtener una corriente de aire desecante 24h al día o altas temperaturas de trabajo (llegando hasta los 550°C).

Cuando se quiere utilizar la corriente desecante durante la noche, el colector solar no ayuda a aumentar la temperatura al fluido de trabajo, debiendo conectar el sistema de suministro de energía exterior.

Estos colectores son más efectivos y fáciles de controlar que los secadores pasivos, aunque el requerimiento de electricidad de los ventiladores y la utilización de combustibles fósiles hacen que los costes de mantenimiento sean más elevados.

2. Colector solar

- ***Secaderos solares activos de tipo integral***

La geometría de estos secadores es muy compacta, ya que no disponen de colector solar, sino que reciben los rayos solares directamente en la cámara de secado. A su vez pueden ser secadores de absorción directa sobre el producto, secadores con pared o cubierta colectora y secadores tipo invernadero con cámara de absorción interna.

- ***Secaderos solares activos de tipo distribuido.***

Son secadores que están formados por un colector solar, la cámara de secado, conducto de unión entre colector y cámara y ventiladores. En el diseño es necesario realizar un estudio entre la potencia de los ventiladores con el nivel de aislamiento.

- ***Secaderos solares activos de tipo mixto.***

La geometría de este sistema es parecida a la del tipo distribuido, es decir, se utiliza un colector solar. La diferencia radica en que la cámara de secado está fabricada con un material translucido que permite que también ahí se absorba energía térmica.

2.2.2 SISTEMAS SOLARES PASIVOS

Los sistemas solares pasivos o de convección natural o libre no utilizan ventiladores para mover el flujo de aire desecante, sino que la diferencia de temperaturas en diferentes partes del fluido provoca una variación de densidad del mismo que provoca un transporte de masa. Dependen totalmente de la energía solar, y esto hace que solo se puedan utilizar durante un acotado número de horas.

La velocidad de la corriente es menor que en la circulación forzada. Normalmente en ventilación forzada se tiene velocidades del orden de 1m/s mientras que en convección natural un valor del orden de 0.1m/s aunque estos valores dependen de la potencia del ventilador en circulación forzada y del diseño de la cámara en los dos tipos de circulación.

Son menos eficientes que los secaderos activos en general, pero presentan algunas ventajas, como son que se pueden utilizar en parajes donde no se dispone de electricidad.

- ***Secaderos solares pasivos de tipo integral***

Al igual que en los secaderos activos, la característica principal es que la cámara de secado realiza las funciones de colector, ya que éste no existe. La construcción y mantenimiento del sistema es más fácil que en los sistemas distribuidos, pero la eficiencia es menor debido a la simplicidad del diseño. Es importante destacar que la velocidad de secado es baja debido al pequeño gasto másico del fluido desecante. Para aumentar este valor se suelen construir con una chimenea que favorezca la circulación.

- ***Secadores solares pasivos de tipo distribuido.***

También llamados secaderos solares indirectos. El producto a secar se encuentra colocado en bandejas en la cámara de secado, que es opaca. La salida del colector solar comunica con la entrada de la cámara de secado y suministra un gasto pequeño de aire a elevada temperatura. También se coloca una chimenea para favorecer el flujo de aire.

El problema es que el colector suministra aire con una gran fluctuación de temperatura que provoca dificultades para mantener las condiciones constantes de la cámara.

- ***Secadores solares pasivos de tipo mixto.***

Poseen las mismas características estructurales que los secaderos pasivos de tipo distribuido, con la salvedad de que la cámara de secado es transparente para aprovechar los rayos solares en la cámara de secado también. Los rayos solares inciden directamente en el producto a secar.

Los secadores solares también pueden ser divididos según la forma de operar. En este caso se tiene dos posibles alternativas: secado en tandas o secado en continuo.

- ***Secado en tandas:***

El secadero solar es llenado con la carga de producto que se considera adecuada y se va secando gradualmente a medida que la corriente de fluido desecante pasa sobre ella. El diseño del sistema de carga y movimiento del producto es más sencillo y es adecuado para secaderos pequeños y medianos.

2. Colector solar

- ***Secado continuo:***

De esta manera se encuentra dentro del secadero solar una parte de producto que está casi seca y otra que apenas ha interactuado con la corriente de fluido desecante. Disponen de un sistema que permite que la carga se mueva por el secadero y el producto se va cargando y descargando en tandas parciales.

Según la capacidad de producción de cada secadero se puede hacer una distinción en el modo de calentamiento, la circulación del aire y la forma de operación:

Capacidad de producción	Modo de calentamiento	Circulación de aire	Forma de operación
Pequeña o baja	Directo	Convección natural	En tanda
Baja o media	Directo	Convección Forzada	En tanda
		Convección natural	En tanda
	Indirecto	Convección natural	En tanda
Media o alta	Indirecto	Convección Forzada	En tanda
	Mixto o Indirecto	Convección Forzada	Continua

Tabla 1:2.1 Sistemas solares pasivos.

En la tabla anterior, se ha realizado el resumen de los sistemas solares pasivos. Se puede observar que se opera de manera continua solo cuando se requieren altas capacidades de producción.

2.3 PARTES DE LOS SECADORES

En la figura 2.7 se puede observar las distintas partes de un secadero solar distribuido. Como se comentó en el apartado 2.2, los secaderos solares distribuidos son más complejos de construir ya que disponen de dos partes claramente diferenciadas:

- ***Colector solar:***

En el número 1 se puede observar como el colector solar se coloca al inicio de la corriente de fluido desecante, que casi siempre es aire. El aire entra

2. Colector solar

por debajo y por medio de las fuerzas de flotabilidad provocadas por diferencias de densidad que dependen de la temperatura, el aire caliente asciende y llega al conducto de unión.

- ***Conducto de unión:***

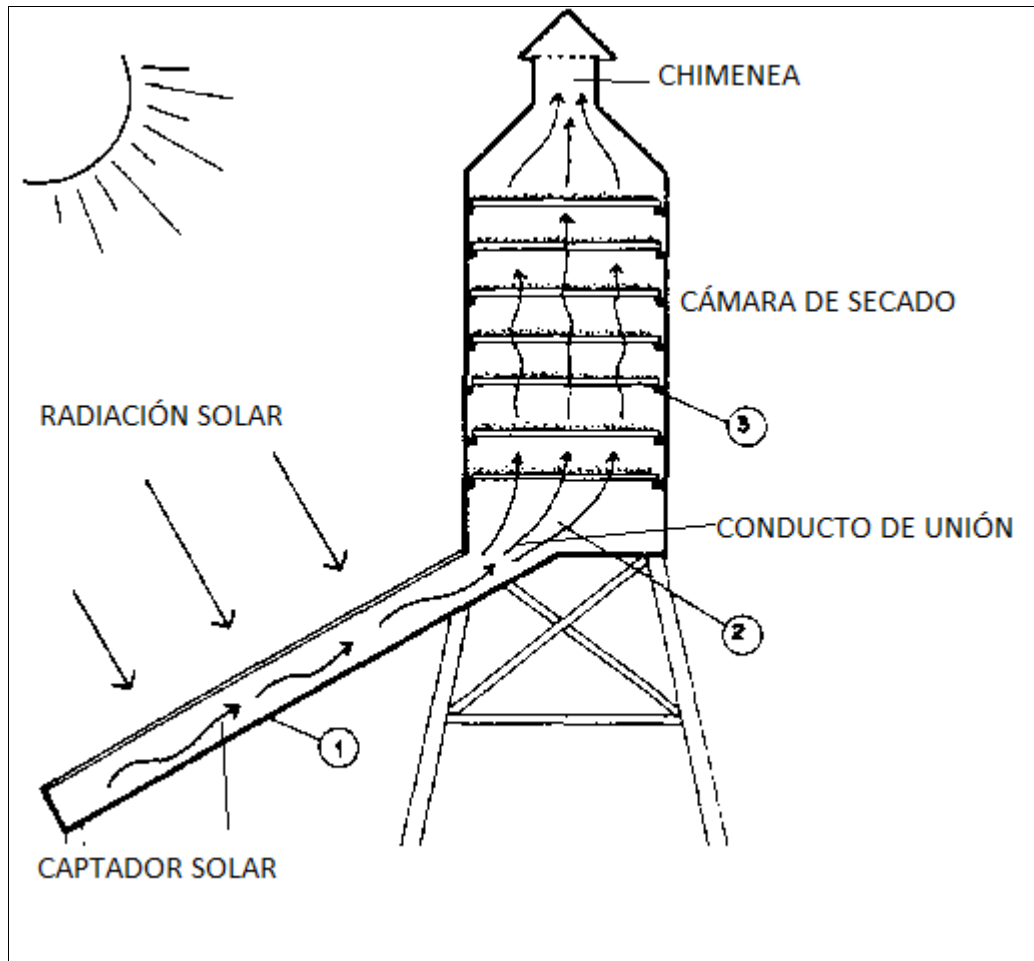
El aire caliente proveniente del colector solar se encuentra con la cámara de secado y ésta actúa como un difusor, según se puede observar en 2.

- ***Cámara de secado:***

El aire caliente interactúa con el producto que se quiere secar absorbiendo una cantidad de humedad que dependerá de la corriente de aire a la salida del colector solar. Cuanto más caliente esté, más humedad se podrá llevar la corriente. Como se comprueba en el número 3 de la figura 2.7 , el producto se extiende en varias bandejas debido a que cuanto más área de producto se encuentre en contacto con el aire, mayor transferencia de masa habrá del producto a la corriente.

- ***Chimenea:***

Se coloca en la parte superior de la cámara de secado para favorecer la circulación de la corriente de aire en secaderos solares pasivos.



- 8.Figura 2.7 Secadero solar pasivo distribuido.

Es importante comentar que la geometría de los secaderos puede variar según la aplicación. Cuanto más producto se quiera deshidratar, se necesitarán bandejas más grandes para poder almacenarlo y una corriente de aire a mayor temperatura o con más caudal. Por ello no hay una configuración ideal para cada situación sino que jugando con geometría, gasto másico de la corriente (con los ventiladores), temperatura de salida del aire después del colector (geometría del colector, tamaño, utilización o no de combustibles fósiles, etc) se pueden obtener varias configuraciones que solucionen el problema. Y el objetivo es seleccionar la más barata que permita solucionar el problema deseado.

2.4 FÍSICA DE LOS CAPTADORES

A la hora de diseñar el secadero para realizar una determinada operación debemos elegir el tipo de secadero, las posibilidades de operación o los materiales de cada componente. Para el colector solar, normalmente se escogen materiales eficientes para el aumento de la temperatura de salida de la corriente de aire y que a la vez reduzcan el calor perdido por las superficies, es decir, materiales aislantes.

2. Colector solar

Para la placa absorbidora normalmente se escoge aluminio, cobre o acero galvanizado, normalmente pintado de negro no reflectante y la placa puede ser lisa, corrugada o en forma de V.

Para la cubierta se escoge normalmente plásticos transparentes con buenas propiedades mecánicas (metacrilato, policarbonato, polietileno, etc).

Y para las paredes, los materiales pueden ser muy diversos, pero deben ser aislantes como lana de vidrio, lana de roca o similares y madera para dar solidez.

El tamaño del secadero es normalmente proporcional a la capacidad de secado y se refiere a la cantidad de producto que es posible secar en cada operación de carga para unos requerimientos específicos de reducción de humedad, expresado normalmente como $\text{kg}_{\text{producto húmedo}}/\text{día}$. La capacidad de secado depende del tipo de producto y de la cantidad de humedad que se ha fijado extraer. Es recomendable no sobrecargar el secadero, ya que disminuirá la eficiencia de secado.

Existen unos datos orientativos que pueden ayudar a la construcción del secadero solar, como son:

- Carga del secadero: $4 \text{ kg}_{\text{producto húmedo}}/\text{m}^2_{\text{área bandeja}}$
- Flujo de aire óptimo: $0.75 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2_{\text{área bandeja}}$
- Superficie de captación necesaria: 0.75 veces el área total de bandeja

En cualquier caso para poder obtener conclusiones óptimas, es necesario poder realizar experimentos y probar el secadero bajo diferentes condiciones para poder llegar a conclusiones acertadas.

Tiempo y ratio de secado.

El objetivo será que el secadero sea capaz de proporcionar el producto bajo condiciones adecuadas de secado en el tiempo mínimo. Este valor se obtiene desde que el secadero es cargado de producto húmedo hasta que el producto alcanza el contenido de humedad deseado incluyéndose los periodos en los que no se dispone de energía solar. Las variaciones del contenido de humedad del producto frente al tiempo marca el ratio de secado.

Temperatura y humedad relativa del aire desecante.

Ambos parámetros son muy importantes en el secado de productos. A medida que se obtiene mayor temperatura de la corriente de aire, mayor capacidad de secado tendrá. Y esto es debido a que la corriente tiene mayor capacidad de absorber humedad y también la corriente incrementa su presión de vapor con la temperatura. Por otro lado,

2. Colector solar

a medida que la temperatura de trabajo aumenta, también lo harán las pérdidas a lo largo del secador.

Si nos centramos en la humedad relativa, el objetivo será que la corriente tenga una humedad relativa baja, y esto se puede conseguir de dos modos: el primero y más común será el de aumentar la temperatura, y el segundo es el de deshumidificar la corriente.

En la construcción del secadero es relevante ver si es posible la recirculación de la corriente. Para ello es necesario que la corriente a la salida tenga capacidad desecante. En la bibliografía se puede leer que recirculaciones superiores al 80% pueden disminuir el consumo de energía solar hasta el 50%.

Caudal másico del aire.

El caudal de aire también es importante en el estudio del secadero solar. Para secaderos con convección forzada este valor será bastante más altos que los que utilicen convección natural.

El hecho de que este valor sea alto es bueno para que la corriente sea capaz de secar más, ya que la potencia intercambiada entre producto y corriente desecante es proporcional al gasto. Sin embargo, si se aumenta el gasto, disminuye la temperatura de salida de la corriente, y la diferencia entre temperatura de salida y temperatura de entrada del aire es proporcional a la potencia intercambiada también. Y el hecho de que la temperatura de salida sea menor, repercute en que las pérdidas también lo serán.

Lo ideal para un secado optimo es empezar con un caudal másico elevado y a medida que el producto se va secando, disminuir el gasto de la corriente desecante.

Eficiencia del colector solar de aire.

La eficiencia del colector solar de aire es un parámetro relevante a la hora de comprobar el funcionamiento correcto o no del secadero. Un valor común para convección natural es del orden del 40-60 %, siendo mayores para convección forzada con un caudal de aire adecuado.

La eficiencia del colector se define como la potencia calorífica que transmitimos a la corriente de fluido, en este caso aire, y la potencia que le llega al captador solar en forma de energía solar.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T \cdot A_c} \quad (2.2)$$

2. Colector solar

Siendo A_c el área de captación en m^2 , I_T la radiación total sobre la superficie inclinada del colector en W/m^2 y Q_U el calor que absorbe la corriente de aire desde que entra al colector hasta que sale de él y tiene unidades de W .

$$Q_U = m_a \cdot c_{pa} \cdot (T_o - T_i) \quad (2.3)$$

Siendo m_a el caudal másico de aire (kg/s) c_{pa} el calor específico del aire ($J/Kg \cdot ^\circ C$), T_o la temperatura a la salida del colector y T_i la temperatura a la entrada, y las unidades de dichas temperaturas deben ponerse en la misma unidad, es decir, en grados kelvin o en grados Celsius.

Finalmente, la expresión final que queda del rendimiento o eficiencia del colector solar de aire es:

$$\eta = \frac{m_a \cdot c_{pa} \cdot (T_o - T_i)}{I_T \cdot A_C} \quad (2.4)$$

Eficiencia del secado.

En la eficiencia del colector solar de aire, el resultado final queda en función de las temperaturas de entrada y de salida de la corriente. Pero puede ser más conveniente para algunas aplicaciones dejar la eficiencia en función de humedades relativas. Este valor también recibe el nombre de (pick-up efficiency) en inglés.

$$\eta_p = \frac{W_0 - W(t)}{\rho \cdot V_a \cdot t \cdot (\omega_{2a} - \omega_1)} \quad (2.5)$$

Donde W_0 representa el peso inicial (kg), $W(t)$ representa el peso del producto tras un tiempo t (kg), ρ es la densidad del aire (kg/m^3), V_a el flujo volumétrico de aire (m^3/s), t es el tiempo en segundos, w_{2a} es la humedad absoluta del aire a la salida del secadero en condiciones de saturación adiabática (kg_{agua}/kg_{aire}) y w_1 la humedad absoluta del aire a la entrada del secadero (kg_{agua}/kg_{aire}).

El valor de la “pick-up efficiency” disminuye a medida que baja el contenido de humedad del producto, ya que cada vez será más complicado absorber agua del producto puesto que queda menos.

Eficiencia del secadero solar.

Esta eficiencia mide conjuntamente lo bien o mal que está diseñado el secadero completo, es decir, captador solar más cámara de secado. En una medida de la energía incidente, es decir, cómo la radiación solar es utilizada para secar productos.

Unos valores orientativos son de entre 10-50%. La variación tan sustancial es debida a que puede variar el funcionamiento y el tipo de secadero:

- **Secadores solares de convección natural:**

La expresión que nos da la eficiencia del secadero solar en un secador que funciona mediante convección natural es:

$$\eta_s = \frac{(W_0 - W(t)) \cdot L_v}{H_T \cdot A_C} \quad (2.6)$$

Donde H_T representa la radiación horaria sobre la superficie inclinada del colector (kJ/m^2) y L_v es el calor latente de vaporización del agua para la temperatura del aire de salida (kJ/kg).

- **Secadores solares con convección forzada:**

La expresión que se obtiene para la eficiencia es muy parecida que en el caso anterior, salvo que además hay que tener en cuenta el consumo de energía de los ventiladores, $P_v(\text{kJ})$

$$\eta_s = \frac{(W_0 - W(t)) \cdot L_v}{H_T \cdot A_C + P_v} \quad (2.7)$$

- **Secadores solares híbridos:**

La expresión es semejante a la anterior pero además hay que tener en cuenta que se utiliza una segunda fuente de energía, que puede ser la biomasa, y se debe añadir un tercer miembro en el denominador:

$$\eta_s = \frac{(W_0 - W(t)) \cdot L_v}{H_T \cdot A_C + P_v + m_c \cdot PCI} \quad (2.8)$$

Siendo m_c la masa del combustible fósil (kg) y PCI el poder calorífico inferior en (kJ/kg).

Las eficiencias descritas en las ecuaciones 2.6, 2.7 y 2.8 Son un parámetro muy utilizado a la hora de caracterizar el funcionamiento del colector ya que en el denominador se aprecia claramente cómo se han ido introduciendo parámetros que reducen la eficiencia, puesto que son pérdidas energéticas directa o indirectamente.

2.5 DESCRIPCIÓN DEL CAPTADOR

Cuando la luz solar incide sobre una superficie opaca puede ser reemitida por la misma sin cambiar su frecuencia (reflexión) o absorbida por ésta, en cuyo caso su energía se transformará en movimiento térmico aumentando por tanto la temperatura de la superficie. Dicho aumento de temperatura hace que, por encontrarse a una temperatura superior a la del ambiente que la rodea, la superficie radie calor proporcionalmente a la diferencia entre las temperaturas a la cuarta. No obstante, dado que la temperatura de emisión es baja la longitud de onda será grande (luego su energía asociada será baja), es decir, la superficie emitirá en el infrarrojo.

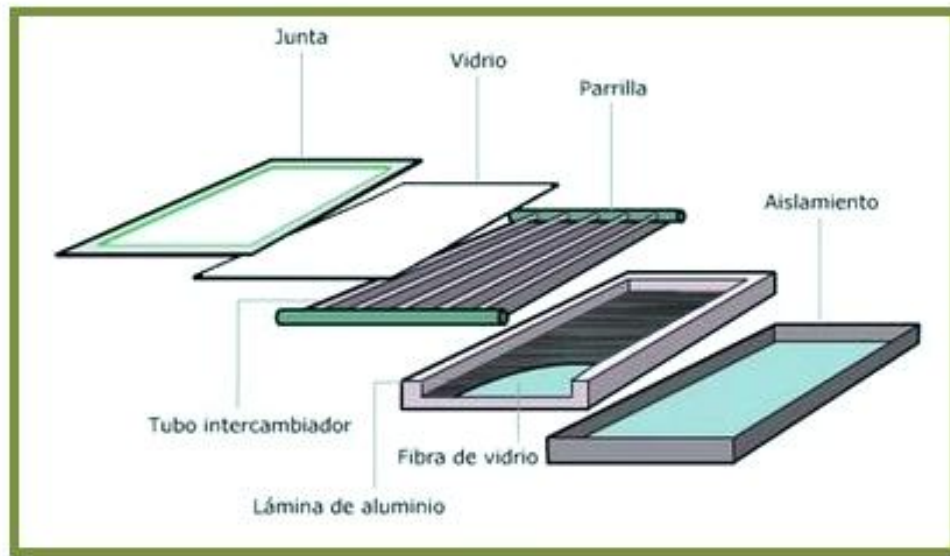
El principio de funcionamiento de un colector solar plano con cubierta es que la placa absorbidora tenga una gran capacidad de absorción de la energía solar y una baja emisividad y que el captador sea capaz de neutralizar la emisión de la placa en el infrarrojo.

El componente principal de un colector solar plano es el convertidor, que se compone de la placa absorbente y los conductos. Su principal función es transformar en calor la radiación solar y transferir este calor al fluido que circula por los conductos, conocido como fluido calo portador. Para maximizar la ganancia térmica se emplean recubrimientos selectivos que cuentan con una gran capacidad de absorción en las longitudes de onda de la radiación solar y una baja emisividad en el infrarrojo.

Otro componente del colector solar plano es la cubierta que resulta ser prácticamente transparente a la radiación solar transmitiéndose ésta al interior del captador, sin embargo, no permite el paso de la radiación infrarroja a su través creándose en el interior un aumento de la temperatura por efecto invernadero. La cubierta permite también disminuir las pérdidas de calor del colector ya que evita el contacto del aire exterior con el convertidor, eliminando la transferencia convectiva de calor.

Para disminuir aún más las pérdidas de calor en el colector, se instala una capa de material aislante en parte posterior del mismo que permite reducir la pérdida de calor por conducción.

2. Colector solar



- 9.Figura 2.8 Componentes de un colector solar plano de líquido.

En la figura 2.8 se puede contemplar los componentes de los colectores solares planos de líquido.

3 MODELO SIMULADO

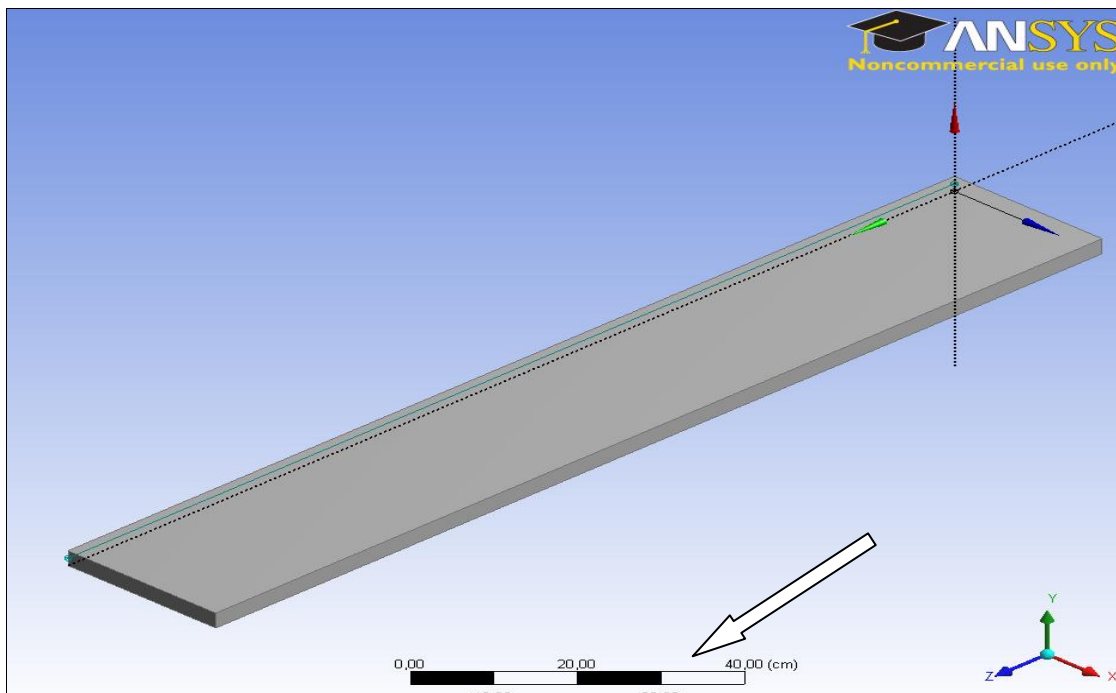
El captador solar simulado se ha realizado mediante el programa Ansys 12.1 y la aplicación Workbench que podemos encontrar en él. Es una herramienta muy interesante que permite de una manera cómoda y ordenada realizar las siguientes acciones:

1. Definir la geometría con la aplicación DesignModeler.
2. Realizar el mallado con la aplicación Meshing.
3. Hacer la configuración con el programa Fluent.
4. Llegar a la solución con el programa Fluent.
5. Obtener los resultados finales con el CFD-Post.

El captador solar tenía unas medidas de 1.5m de profundidad por 0.5m de anchura por 0.03m de altura. En este caso se puede comprobar cómo el modelo tiene un plano de simetría que sería el plano YZ que divide el secador en 2 a lo largo de la dirección Z en el punto medio de X, es decir, en la coordenada $x = 0.25\text{m}$.

Este hecho permite resolver el modelo con la mitad de nodos, y repercute en el tiempo de procesamiento en Fluent de manera significativa.

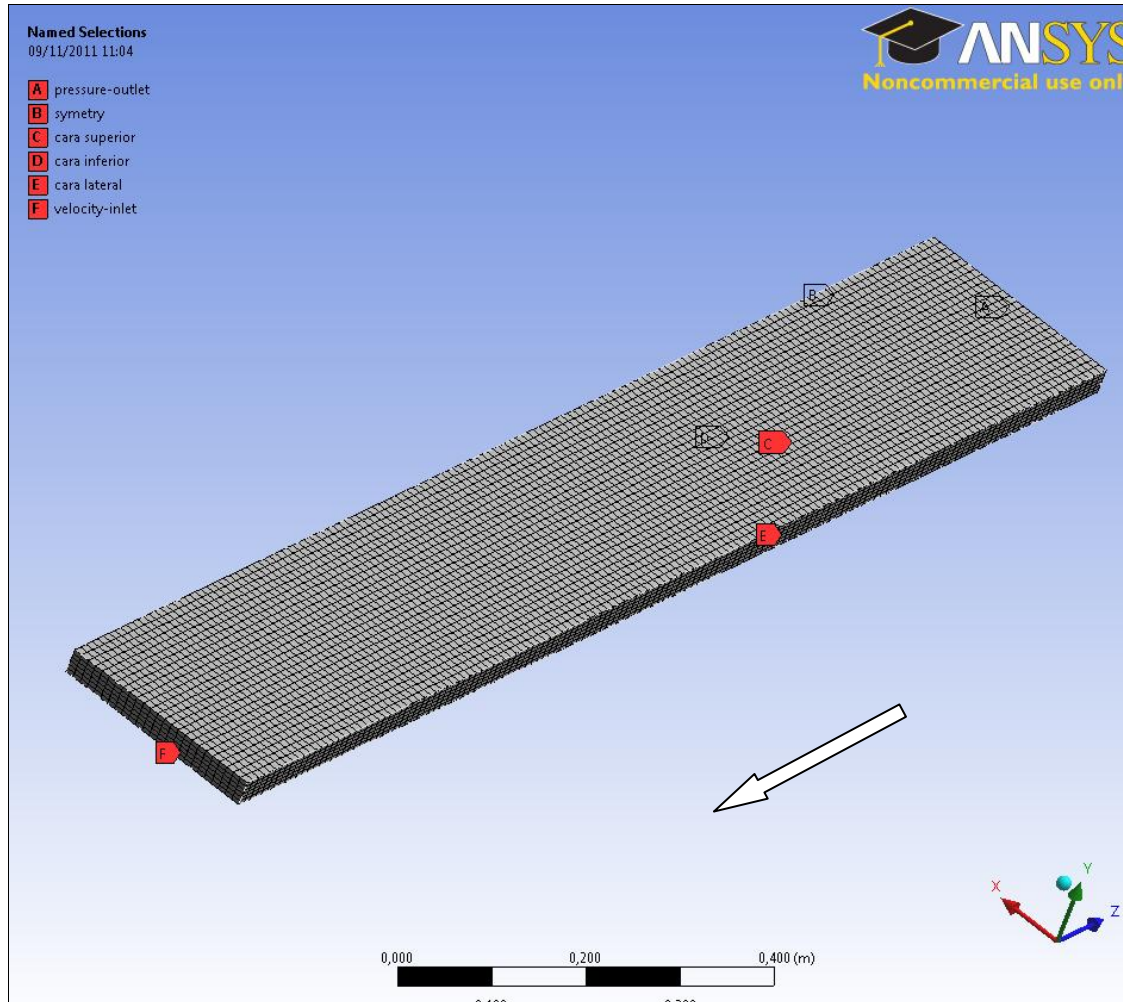
A continuación se muestra una figura de la geometría del modelo simulado. En ella se puede ver como la altura del secador es claramente más pequeña que anchura y profundidad



- 10.Figura 3.1 Vista isométrica de la geometría del modelo simulado.

3. Modelo simulado

En la siguiente figura se puede observar el mallado del captador solar, así como el nombre de las 6 caras que lo componen en la parte superior izquierda de la figura.



- 11.Figura 3.2 Mallado del modelo, perspectiva isométrica.

Se puede comprobar cómo el modelo tiene una dirección (la del eje Y que son 3 centímetros) mucho menor que las otras direcciones (en el eje X, el ancho es de 0.5 metros y en el eje Z, la profundidad es de 1.5 metros).

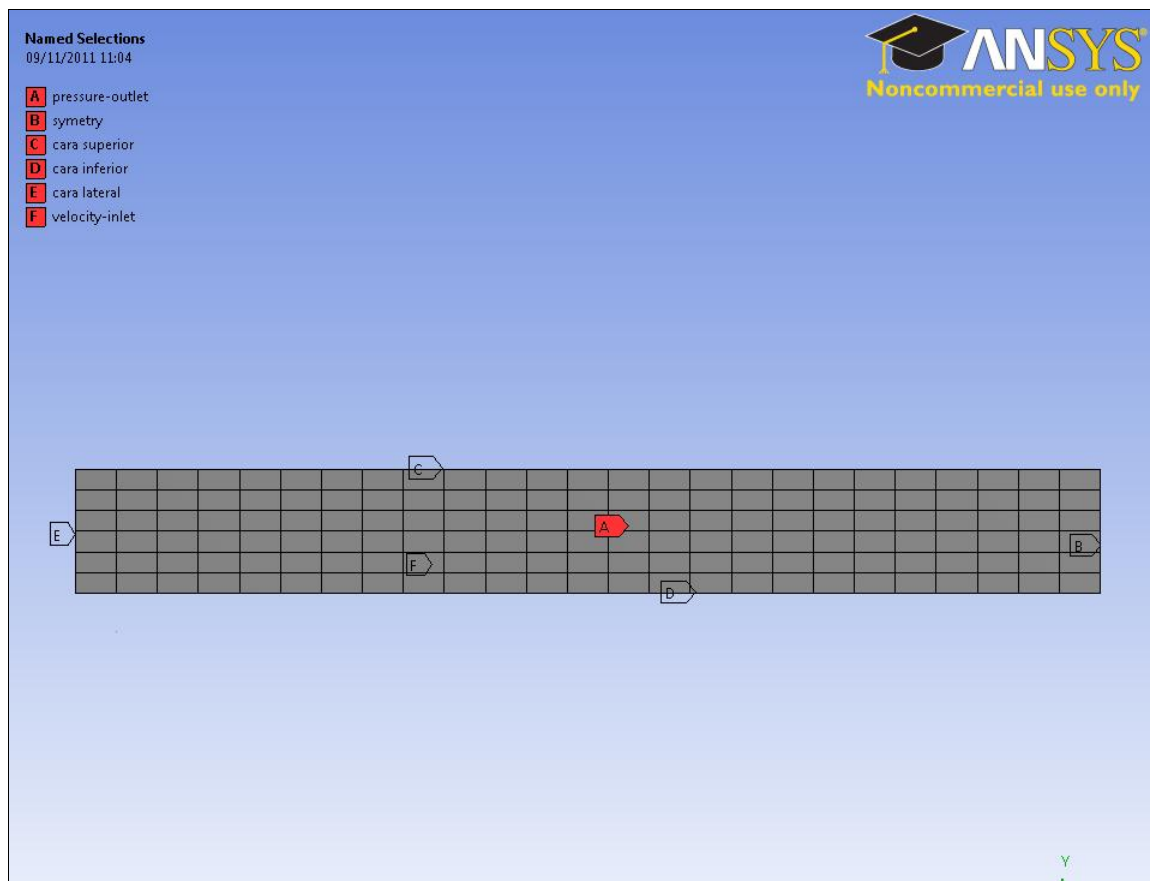
Por ello no es conveniente realizar la malla de una manera uniforme. Lo conveniente sería colocar más nodos en la dirección Y que en las otras dos direcciones. Esto se ha realizado espaciando los nodos cada 0.5 cm en la dirección Y mientras que en la dirección X y Z el espaciado es de 1cm. Esta idea permite obtener más precisión en los resultados sin penalizar en exceso la computación del modelo, ya que si se eligiera una separación de 0.5cm en las 3 direcciones espaciales obtendríamos una cantidad de nodos de 107457 y 90000 elementos, mientras que con nuestro modelo se

3. Modelo simulado

tiene 27482 nodos y 22500 elementos y los resultados que se obtendrían serán idénticos como se demuestra en el apartado 3.1.4.

Este resultado se puede comprobar en la vista frontal del colector, donde se ve que los elementos no son cuadrados, sino rectángulos, y en tres dimensiones no son cubos, sino paralelepípedos de 1cm*1cm*0.5cm.

En la figura 3.3 se puede apreciar como las celdas tiene forma rectangular en lugar de ser cuadrados.



- 12.Figura 3.3 Mallado del modelo, vista frontal.

3.1 MODELO NOMINAL CONVECCION FORZADA.

El modelo nominal estudiado es el de un captador solar con la geometría citada anteriormente 1.5*0.25*0.03 metros. Es conveniente recalcar que se ha estudiado la anchura de 0.25cm por la simetría existente.

Los parámetros que se han estudiado han sido:

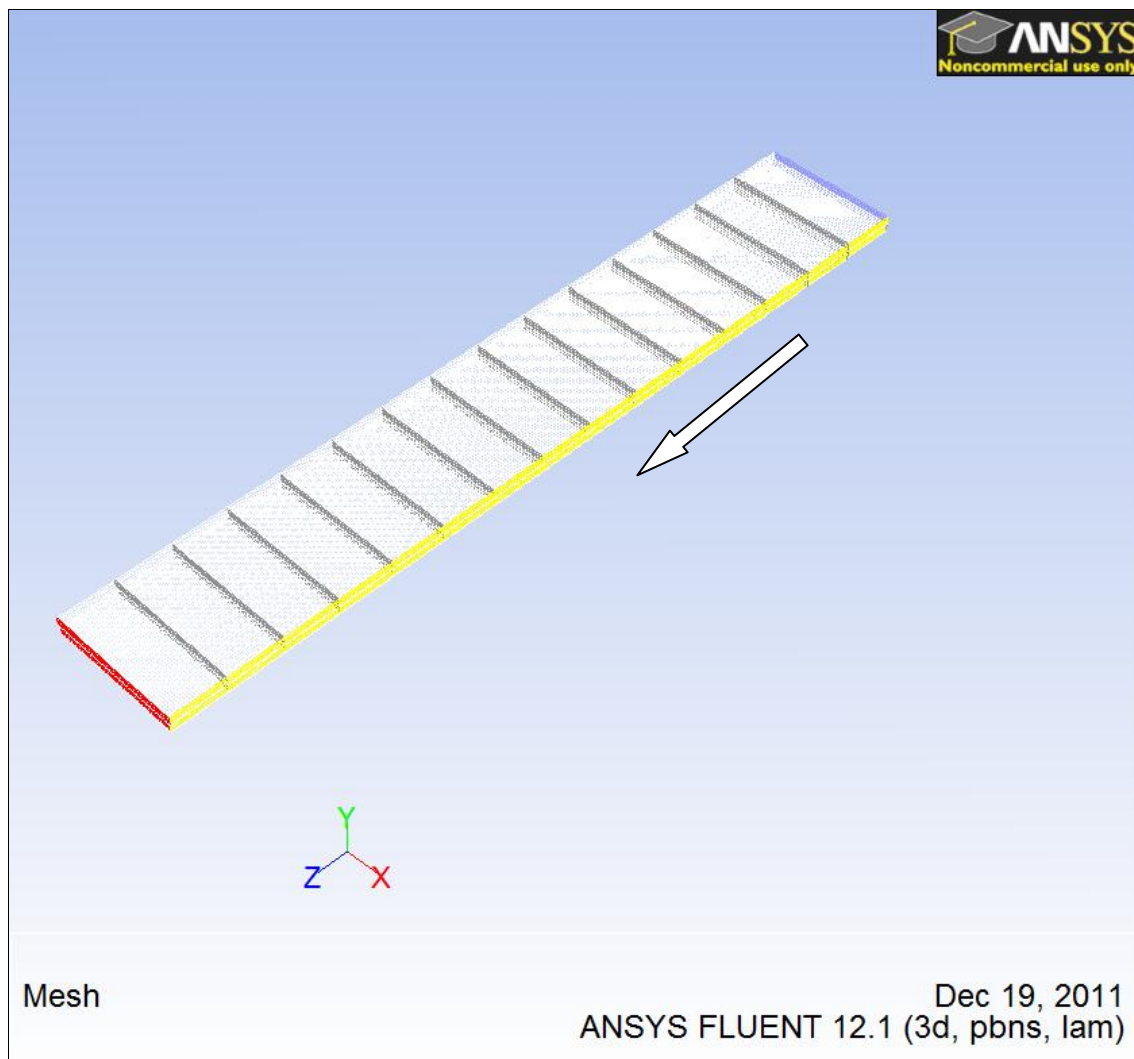
1. Velocidad de entrada: 0.5m/s, 0.75m/s, 1m/s, 1.25m/s y 1.5m/s.
2. Flujo de calor en la superficie de acero inferior: 250, 500, 750, 1000 y 1250W/m².
3. Geometría: altura b=18mm, b=30mm, b=44mm.

3. Modelo simulado

El modelo nominal se realizará a una velocidad de 1m/s, con un flujo de calor proveniente de la superficie de acero negro inferior de 1000 W/m^2 y con una altura del captador solar de 30mm a la entrada y a la salida.

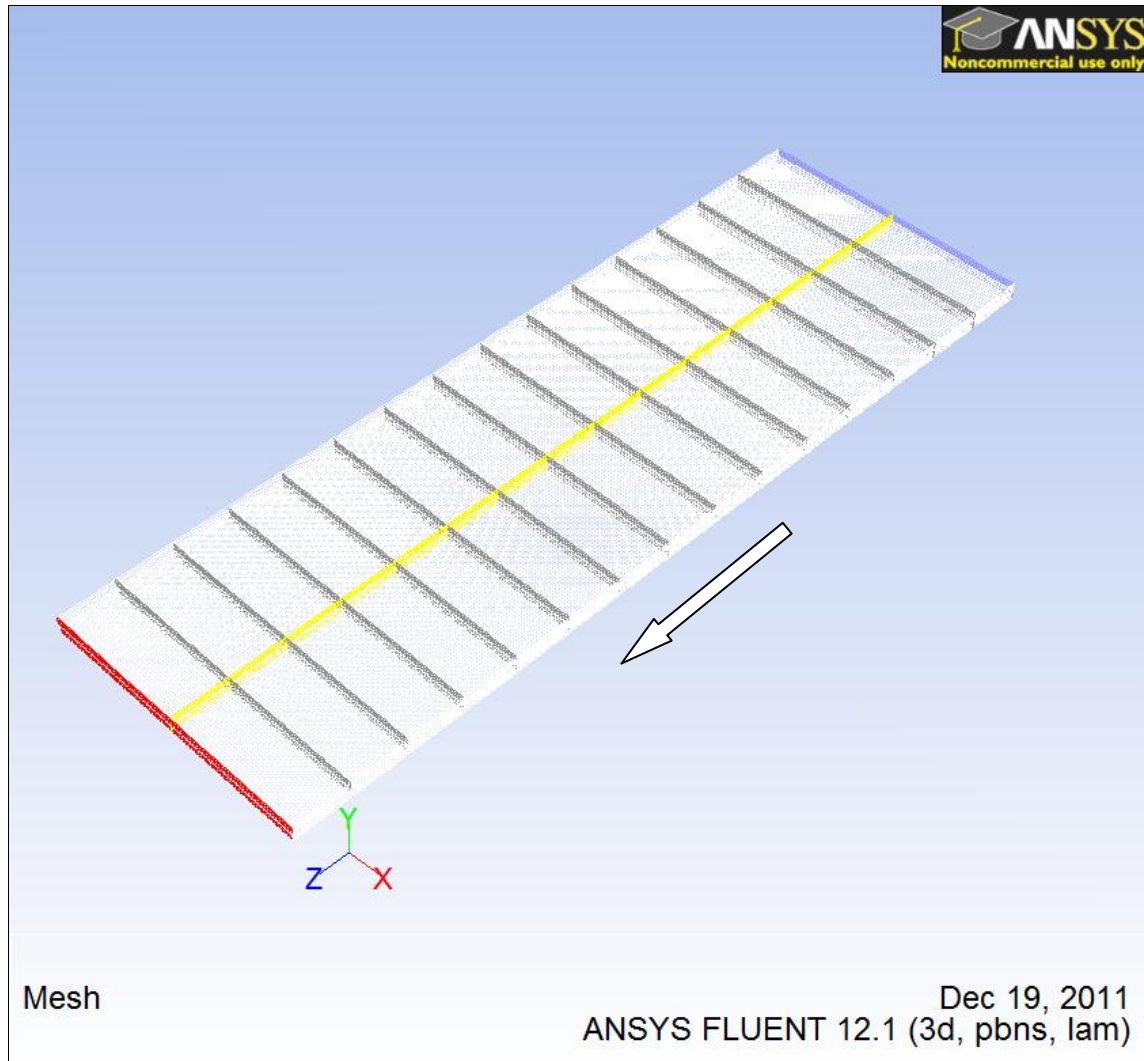
La temperatura de entrada del aire serán 293 K, es decir 20°C .

En la siguiente figura se puede observar los 15 planos que se han colocado para la obtención de resultados. Cada uno se ha colocado a 10 cm del anterior, y de este modo se obtendrán 15 medidas en cada configuración, suficientes para hacernos una idea de lo que está pasando dentro.



- 13.Figura 3.4 Colocación de los 15 planos perpendiculares al flujo.

En la siguiente figura 3.4 se puede observar el plano de simetría que se ha escogido para la simulación de todos los apartados de los que se compone el proyecto. Estudiando una parte de las que se divide la figura, obtendremos unos resultados tan válidos como si se estudiara las 2 partes en las que se divide la figura, como se demostrará en el apartado 3.1.4.



- 14.Figura 3.5 Colocación de los 15 planos perpendiculares al flujo más el eje de simetría.

En la figura 3.5 se ha dibujado la malla completa, aunque como se ha indicado, solo se simulará una de las mitades para ahorrar tiempo computacional.

ESTUDIO DEL REYNOLDS

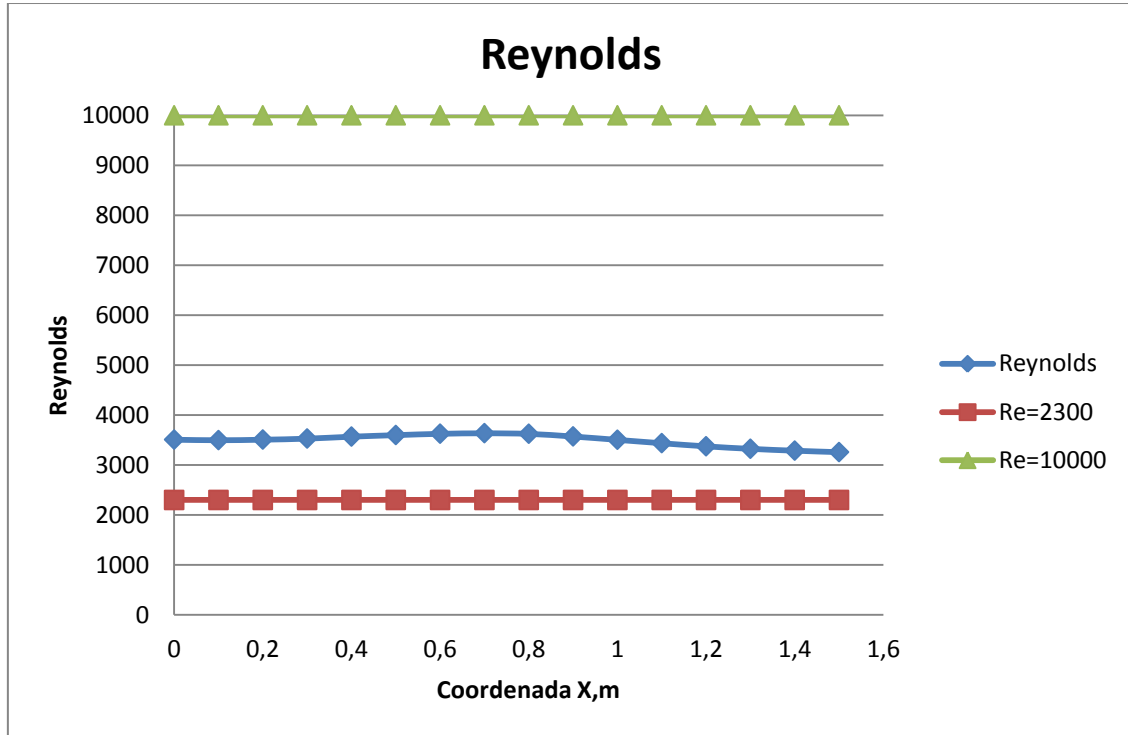
Se pretende estudiar el flujo en el interior de un captador solar, por lo que se utilizará las leyes de flujo interno, ya que el fluido a estudiar está confinado dentro de una geometría. La configuración de flujo interno se estudia ampliamente para calentar o enfriar fluidos utilizados en la industria química, control medioambiental y tecnologías de intercambio de energía.

El número de Reynolds crítico para flujo interno es de 2300. Para un flujo laminar el Reynolds vale menos de 2300 y para uno turbulento el valor del Reynolds es mayor a este valor. En cualquier caso, este número no es exacto y puede cambiar en

3. Modelo simulado

cada sistema y se estima que para afirmar con veracidad que un flujo es turbulento $Re_d > 10000$.

En nuestro captador solar se han calculado los siguientes valores para el Reynold:



- 15.Figura 3.6 Representación del Reynolds a lo largo del captador.

Se puede comprobar cómo el valor del número de Reynolds simulado es mayor que 2300 en cada división del captador solar (en azul). El máximo valor de dicho número es 3638 en $x = 0.7m$, es decir, en el centro del captador solar.

Los valores han sido calculados utilizando el diámetro hidráulico e interpolando la viscosidad cinemática variable según la temperatura en cada región:

$$Re = \frac{\rho \cdot u_m \cdot D_h}{\mu} = \frac{u_m \cdot D_h}{\nu} \quad (3.1)$$

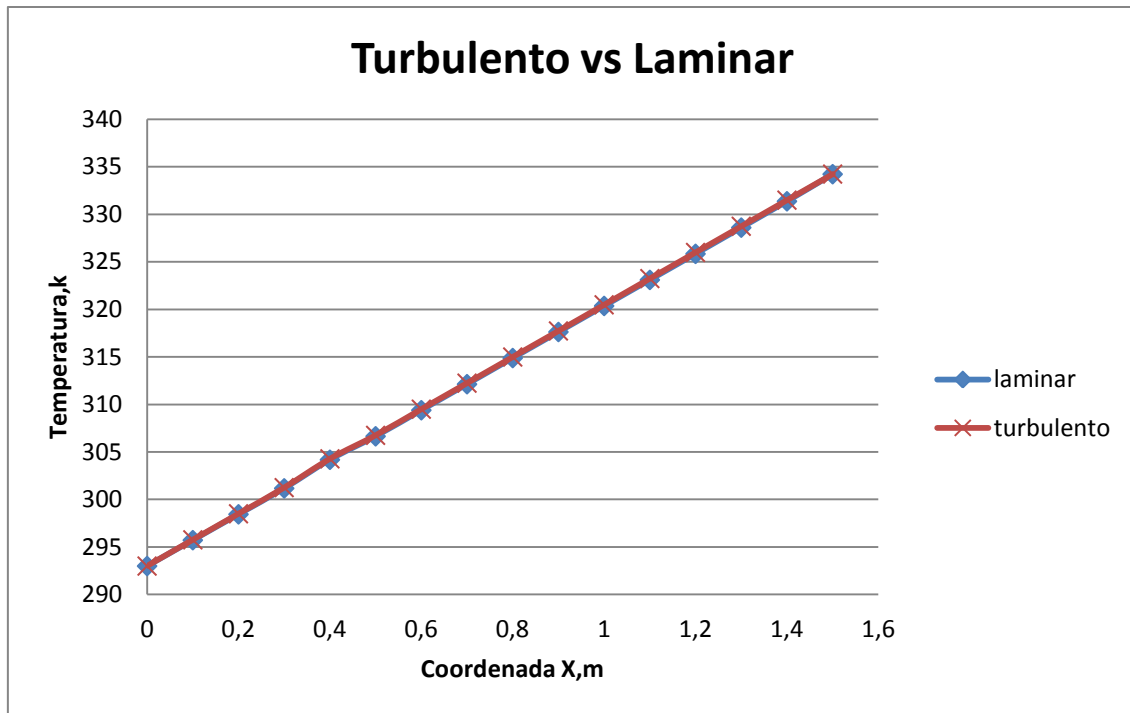
Con el D_h correspondiente a la geometría utilizada en el cálculo que como se ha comentado es la mitad del captador solar gracias a la simetría existente:

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{p} = \frac{4 \cdot 0.03 \cdot 0.25}{2 \cdot (0.03 + 0.25)} = 0.05357m \quad (3.2)$$

A la vista de los resultados nos encontramos en la región donde no está muy claro si el flujo es turbulento o laminar. Por ello se ha decidido comparar ambas

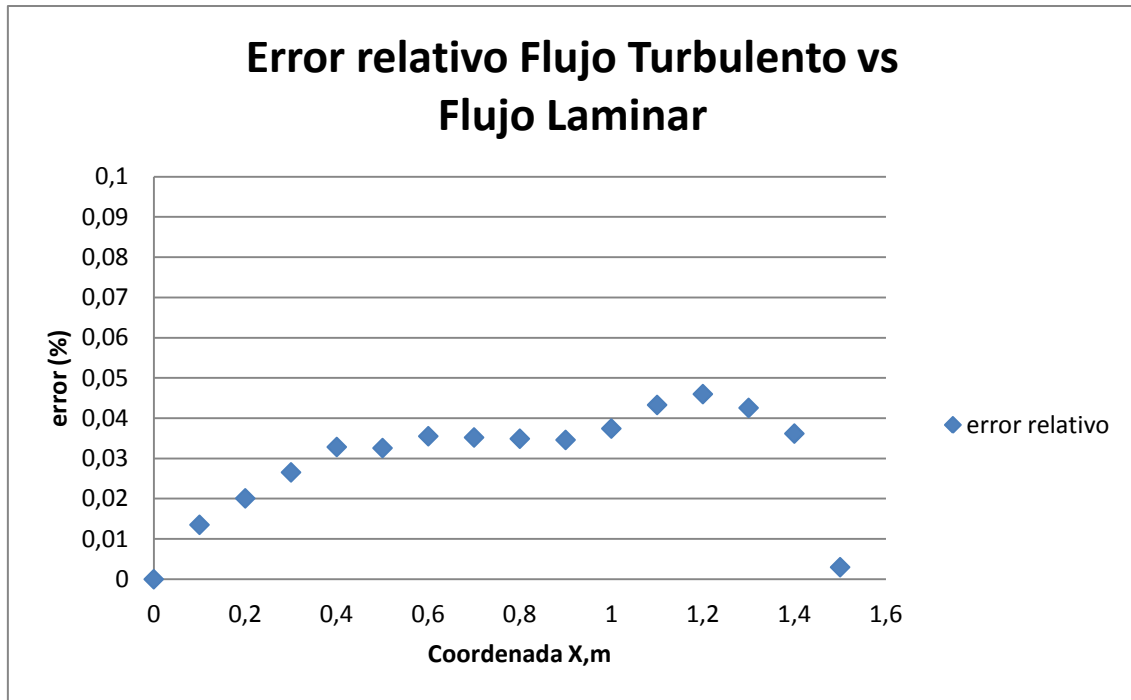
3. Modelo simulado

situaciones mediante un estudio detallado en Fluent y comparar los resultados obtenidos:



- 16.Figura 3.7 Comparación flujo Turbulento vs Flujo Laminar.

Como se puede observar en la figura 3.7, parece que los resultados que se obtiene son muy semejantes. Para poder hacer una buena comparación se hallará el error relativo en cada uno de los 16 planos ortogonales a la corriente existente, contando con los planos de entrada (velocityinlet) y salida (pressureoutlet):



- 17.Figura 3.8 Error relativo Flujo Turbulento vs Flujo Laminar.

Se puede comprobar en la figura 3.8 que el error cometido utilizando flujo laminar o utilizando flujo turbulento es despreciable, ya que el error máximo cometido es siempre inferior al 0.05%, deduciendo que para la simulación del flujo estudiado en Fluent va a ser indiferente utilizar una configuración con flujo laminar u otra con flujo turbulento, debido a que el Reynolds es próximo a 2300.

ESTUDIO DE VELOCIDADES

En las siguientes 2 figuras se puede comprobar la variación de la velocidad media de la corriente en el interior del captador solar.

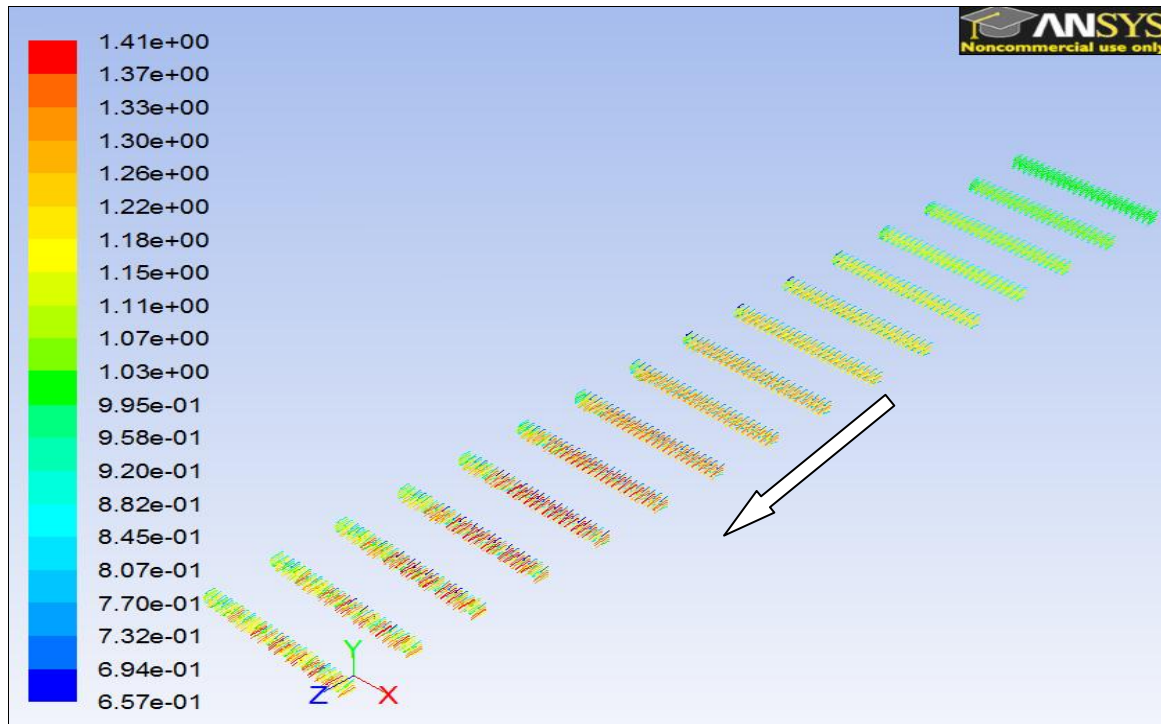
Por la conservación de la masa se obtiene que el gasto másico de fluido, en nuestro caso aire, debe ser constante a través de los 15 planos perpendiculares a la corriente del fluido, es decir:

$$\dot{m} = A \cdot \rho \cdot v = cte \quad (3.3)$$

El gasto debe ser contante, el área A también lo es, mientras que la densidad ρ y la velocidad v son variables a lo largo de la dirección Z.

Se puede comprobar en la leyenda cómo los tonos rojos son donde encontramos velocidades puntuales más elevadas, mientras que los tonos azules son los de velocidades nulas o próximas a cero.

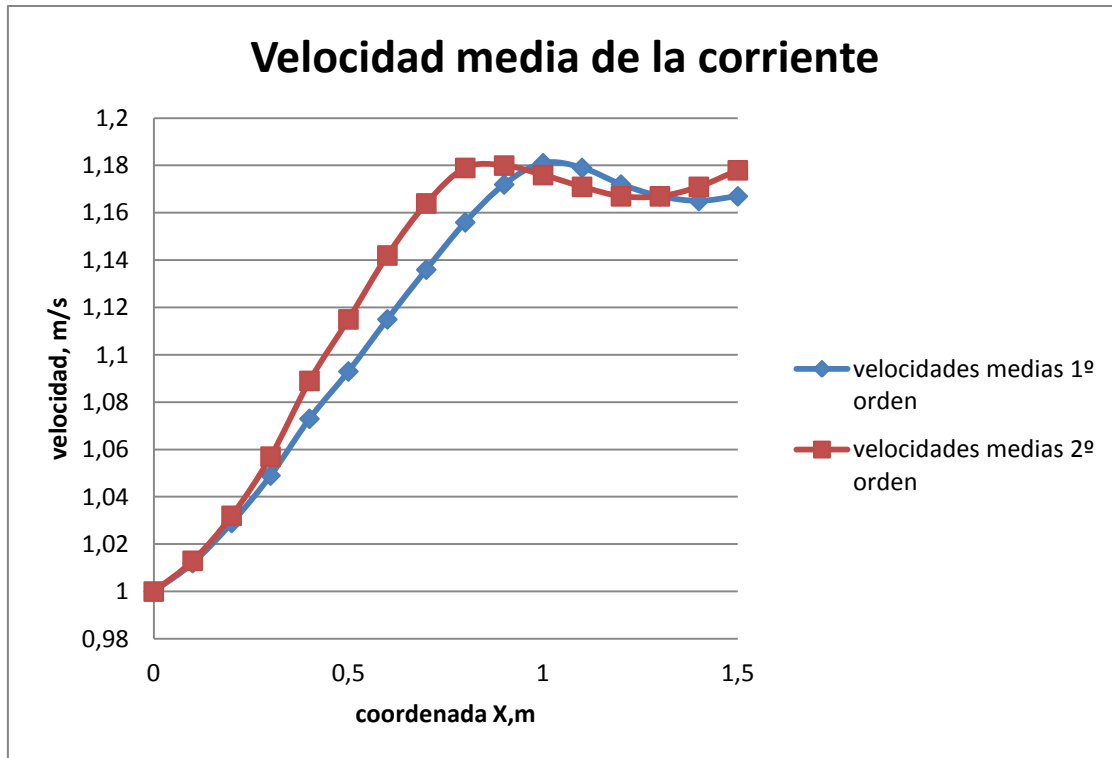
3. Modelo simulado



- 18.Figura 3.9 Velocidades en forma de vector.

En la figura 3.9 se puede comprobar cómo se parte de una corriente uniforme de 1m/s en la zona de la entrada (en la parte superior derecha de la imagen, de color verde) y cómo evoluciona la corriente acelerándose. Este hecho se va a ver mejor en la siguiente figura, donde se obtienen 15 valores, correspondiéndose cada valor a la media en cada plano:

3. Modelo simulado



- 19.Figura 3.10 Velocidades medias.

En la figura 3.10 se observa la aceleración de la corriente. Se ha realizado primero el análisis de la ecuación de la energía “first orden upwind” y una vez que convergió se hizo lo mismo con la de segundo orden “second orden upwind”.

Se ha realizado así porque en la bibliografía comprobamos que una solución convergida no es necesariamente correcta. Los pasos para llegar a una solución correcta son:

1. Comparar siempre con datos que sigan los principios físicos.
2. Usar siempre datos de 2º orden de precisión.
3. La solución debe ser independiente de la malla. Utilizar adaptaciones de la malla, colocando un mayor número de nodos.

Se puede comprobar en la figura 3.10, centrándonos en los datos de 2º orden cómo la velocidad máxima es de 1.18 m/s en 0.9 metros del captador y la mínima es en el comienzo del captador, que es de 1 m/s, y es la que se ha elegido en las condiciones de contorno de velocity Inlet.

Otro parámetro que también se ha seleccionado dentro de todas las posibles opciones de Fluent ha sido que la densidad varíe con la temperatura con la opción “incompressible Ideal gas”.

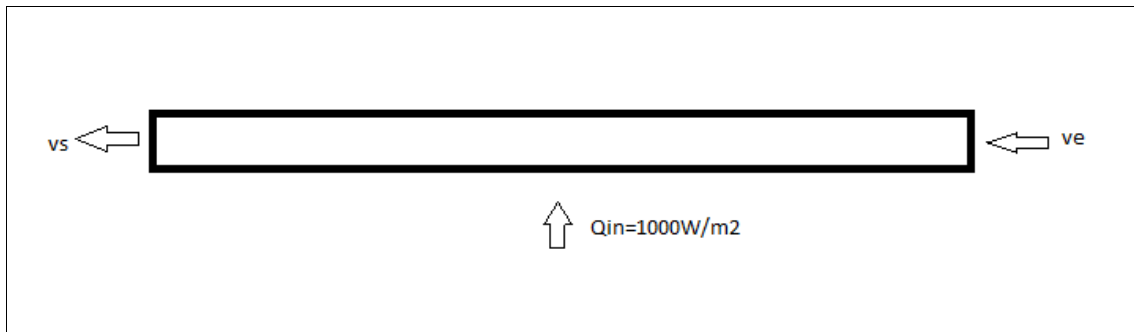
3. Modelo simulado

$$\rho = \frac{P_{op}}{\frac{R}{M_w} \cdot T} \quad (3.4)$$

Donde P_{op} es la presión de operación y de este modo la densidad depende de ésta y no de la presión local relativa. De este modo se puede ver cómo a medida que avanzamos en el captador, la transferencia de calor de la superficie inferior caliente al fluido hace que vaya aumentando la temperatura de la corriente de aire, bajando su densidad. Pero como $\dot{m} = A \cdot \rho \cdot v$ es constante, la velocidad debe compensar que la densidad vaya bajando, acelerándose.

ESTUDIO DE LA TEMPERATURA

En primer lugar se va a estimar la temperatura aproximada de la salida del captador solar, y la compararemos con el valor obtenido en el programa Fluent, comprobado que los errores cometidos son pequeños.



- 20.Figura 3.11 Balance energético.

La corriente entra y recibe calor por la parte inferior debido a una placa que es calentada por la acción de los rayos solares y es capaz de suministrar al aire 1000 W/m^2 .

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} \cdot v_e^2 + g \cdot z_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} \cdot v_s^2 + g \cdot z_s \right) \quad (3.5)$$

Suponemos que es un proceso estacionario y no hay trabajo realizado por el sistema:

$$0 = \dot{Q}_{in} + \dot{m} \left[(h_e - h_s) + \frac{1}{2} (v_e^2 - v_s^2) + g (z_e - z_s) \right] \quad (3.6)$$

3. Modelo simulado

Despreciamos los términos frente a los términos de entalpía. Además suponemos que el flujo es de un gas ideal caloríficamente perfecto: G.I.C.P.

$$0 = \dot{Q}_{in} + \dot{m} \cdot [c_p \cdot (T_e - T_s)] \quad (3.7)$$

Y despejando la temperatura de salida del captador solar:

$$T_s = T_e + \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (3.8)$$

Esta ecuación sirve para predecir la temperatura de salida en un conducto que suministra un flujo de calor constante al fluido en flujo interno.

En el modelo nominal la temperatura de entrada eran 20°C , el calor suministrado por la superficie inferior son 1000 W/m² el área inferior son 1.5 m por 0.25 m (debido a que se ha simplificado el modelo utilizando una condición de contorno de simetría, symmetry), la velocidad de entrada es de 1m/s, la densidad del aire a 20 ° C es de 1.1618 kg/m³, el área de entrada es de 0.25 m por 0.03 m y el calor específico es de 1004,5 J/kg·k. así que el resultado aproximado que deberíamos obtener en el Fluent es de:

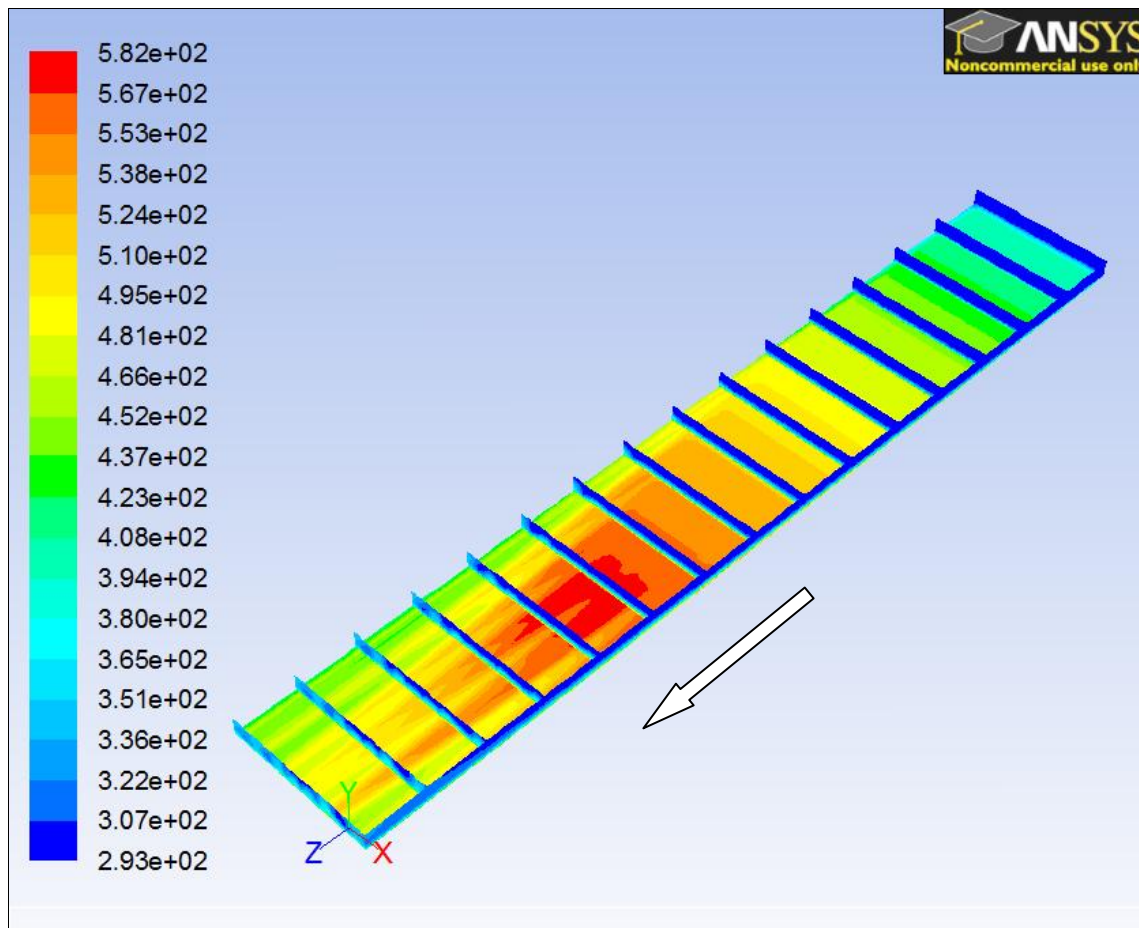
$$T_s = T_e + \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m} \cdot c_p} = 20^\circ C + \frac{1000W / m^2 \cdot 0.25m \cdot 1.5m}{1m / s \cdot 1.1618kg / m^3 \cdot 0.25m \cdot 0.03m \cdot 1004J / kg \cdot k} = 20 + 42.84 = 62.84^\circ C$$

Con:

$$\dot{m} = A \cdot \rho \cdot v \quad (3.9)$$

La temperatura media de salida será de 62.84°C es decir, 335.84k

3. Modelo simulado

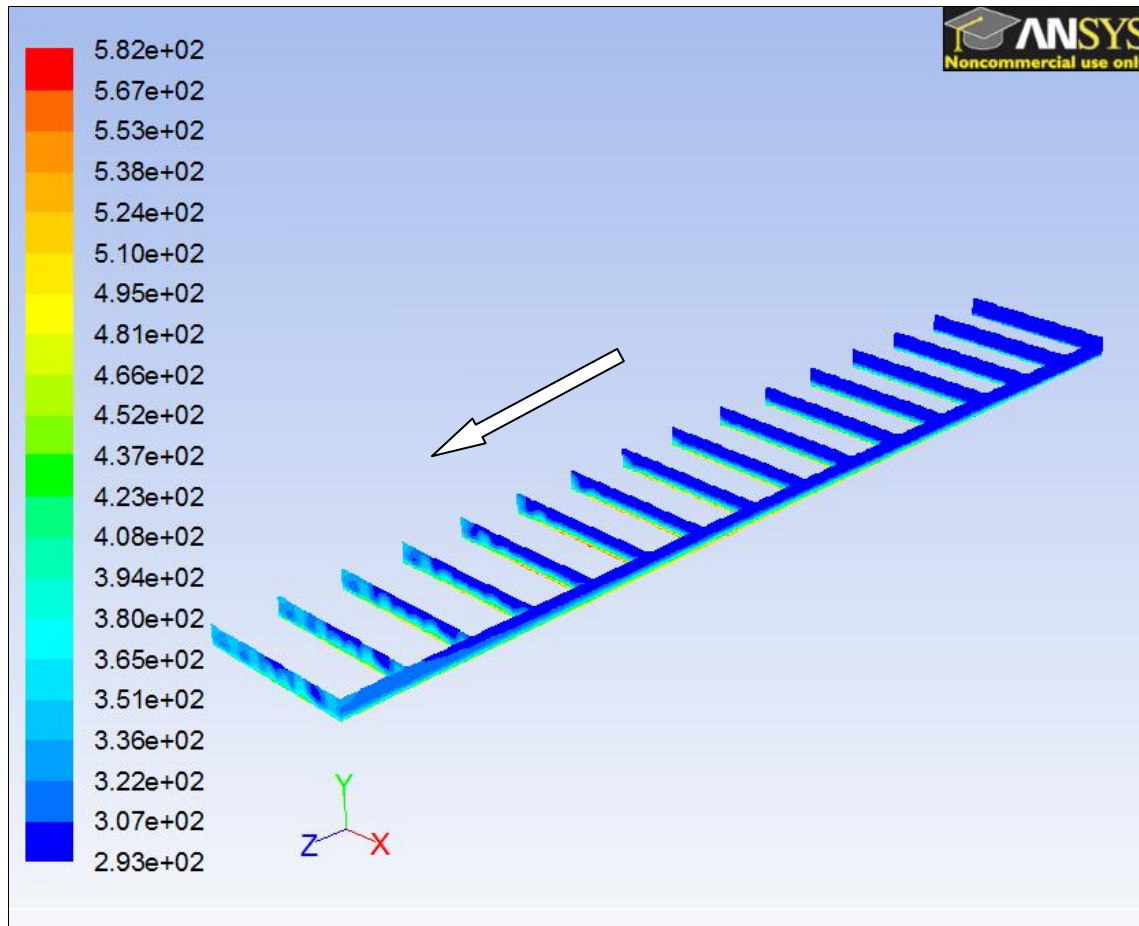


- 21.Figura 3.12 Temperaturas.

En la figura 3.12 se puede comprobar la distribución de temperaturas puntuales dentro del captador solar. Como cabe esperar, las temperaturas puntuales más elevadas se encuentran junto a la superficie inferior, ya que es donde las partículas de aire reciben el calor de 1000 W/m^2 .

En la figura 3.12 se ha realizado la foto de solo la mitad del captador, pero se ha comentado ya que la otra parte es simétrica respecto al plano de simetría que es la cara vertical que se encuentra en la parte de la derecha.

3. Modelo simulado

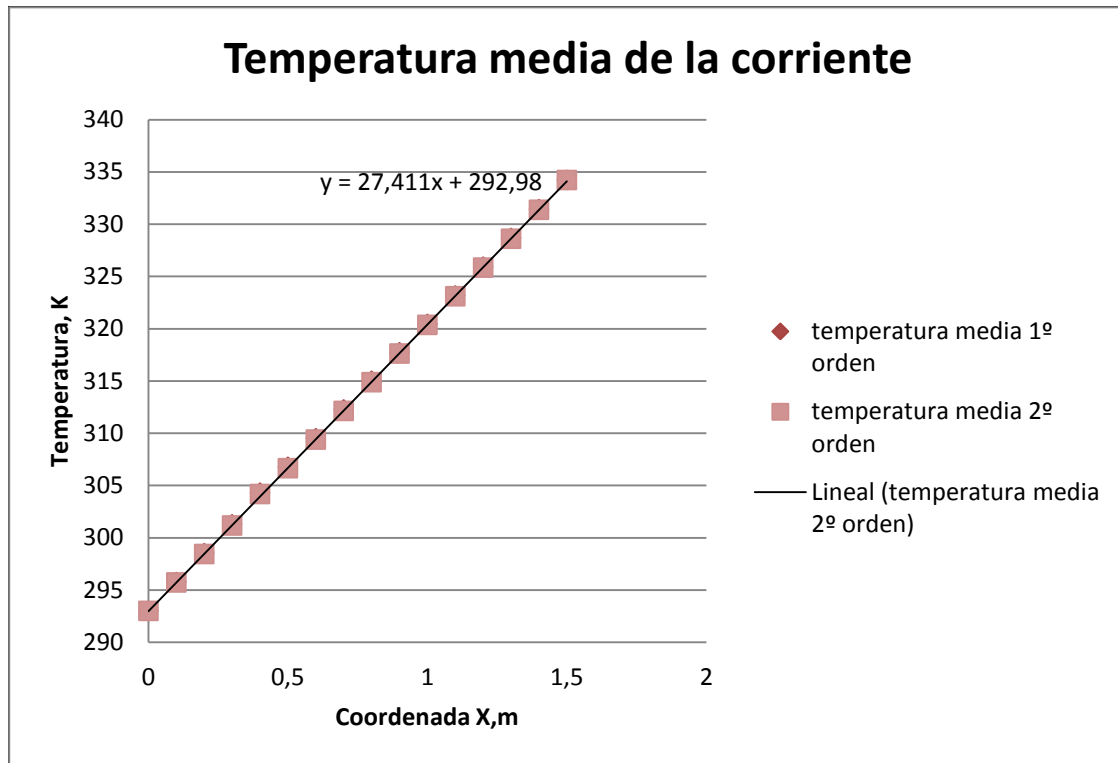


- 22.Figura 3.13 Temperaturas (2).

En la figura 3.13 se comprueba como la corriente va aumentando la temperatura desde el inicio del captador (derecha) al final (izquierda). Los valores puntuales de temperatura no son los que dan más información, sino los valores promedios de temperatura en cada una de las 15 divisiones que se han realizado en el captador solar.

Este hecho se puede comprobar bien en la figura 3.14 en la que se estudia la temperatura en grados kelvin frente a la posición dentro del captador solar:

3. Modelo simulado



- 23.Figura 3.14: Temperatura medias primer orden y segundo orden.

En la figura 3.14 se puede observar como coinciden los valores que se obtienen en 1º orden y en 2º orden. También se puede ver como el aumento de temperatura a lo largo del captador solar es lineal frente a la distancia. Se obtiene que aumentando un metro en el interior del captador la corriente de aire se caliente 27.41 grados en las condiciones estándares.

La temperatura máxima alcanzada en la simulación de Fluent es de 334.22k. La que se había previsto utilizando balances de energía y haciendo simplificaciones como que no hay pérdidas a lo largo del sistema y que el flujo es estacionario era de 335.84k.

Por tanto se puede obtener el error cometido que será:

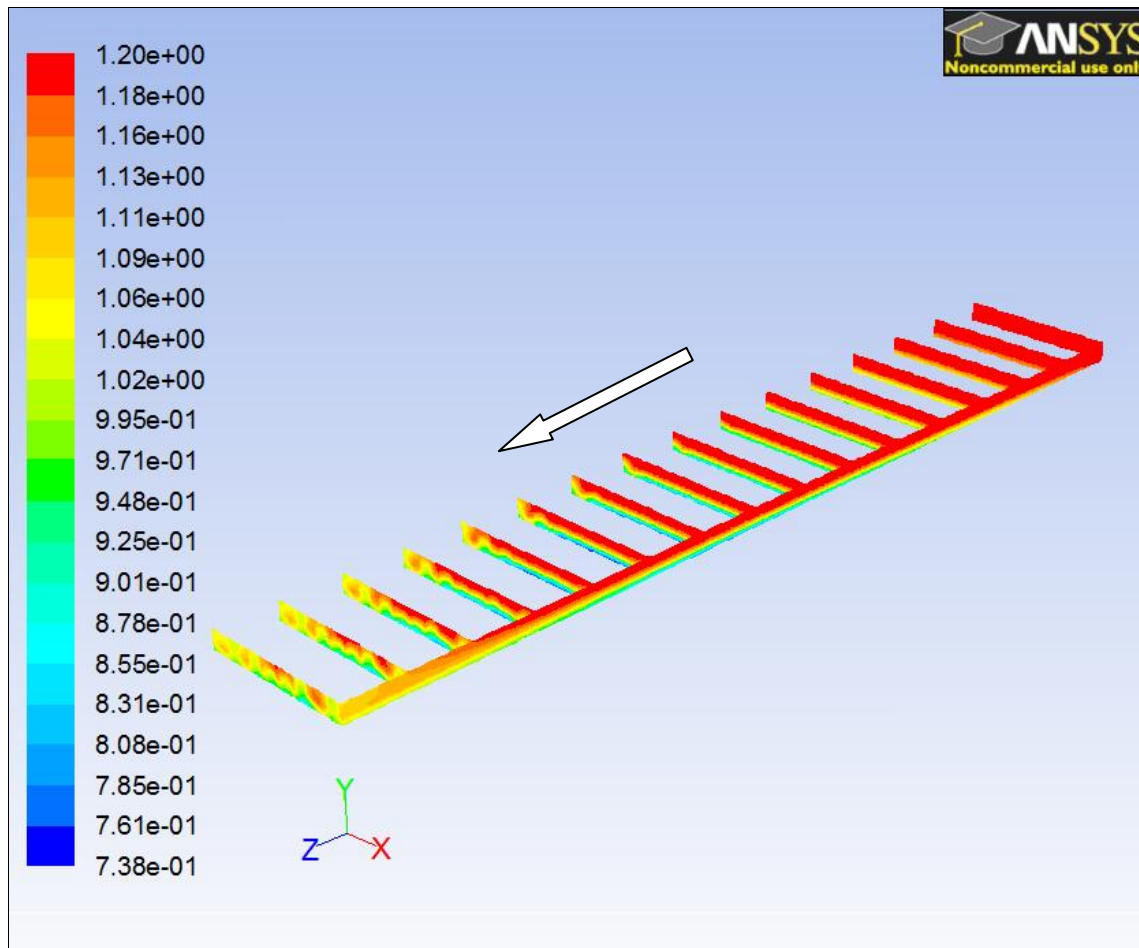
$$e(\text{temperatura}) = \frac{|335.84 - 334.22|}{334.84} = 0.0048 = 0.48\% \quad (3.10)$$

Se puede comprobar cómo el resultado obtenido mediante la simulación en Fluent es bastante fiable, ya que es muy próximo al obtenido aplicando balances energéticos.

3. Modelo simulado

ESTUDIO DE DENSIDADES

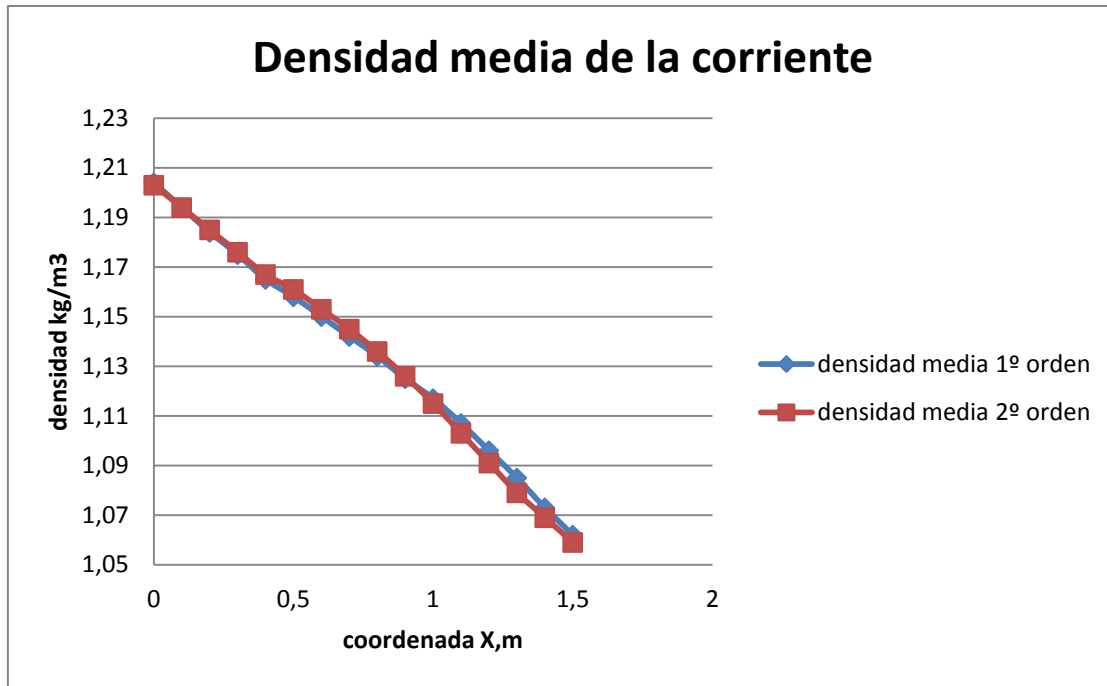
En la figura 3.15 se puede contemplar cómo la densidad va disminuyendo desde 1.2 kg/m^3 que son los colores rojos del principio del captador (derecha) a valores más amarillentos al final del mismo, que indican la disminución de dicho valor.



- 24.Figura 3.15 Densidades.

La densidad media de la corriente va disminuyendo de una manera casi lineal a medida que avanzamos en el colector, al mismo tiempo que la temperatura aumenta de una manera lineal también. También se puede observar en la figura 3.16 que los datos obtenidos en 2° orden son muy similares a los de 1° orden, indicando que el modelo ha convergido de manera adecuada.

3. Modelo simulado



- 25.Figura 3.16 Densidad de la corriente.

El valor máximo de la densidad se obtiene en la primera división del captador y es de 1.203 kg/m^3 . El valor mínimo se obtiene al final de las 15 divisiones y es de 1.059 kg/m^3 .

ESTUDIO DEL GASTO MÁSIKO

El gasto másico debería ser constante a lo largo de cada una de las 15 divisiones del colector. Se ha obtenido un valor medio de 0.00956 kg/s un mínimo de 0.00902 kg/s y un máximo valor de 0.01004 kg/s .

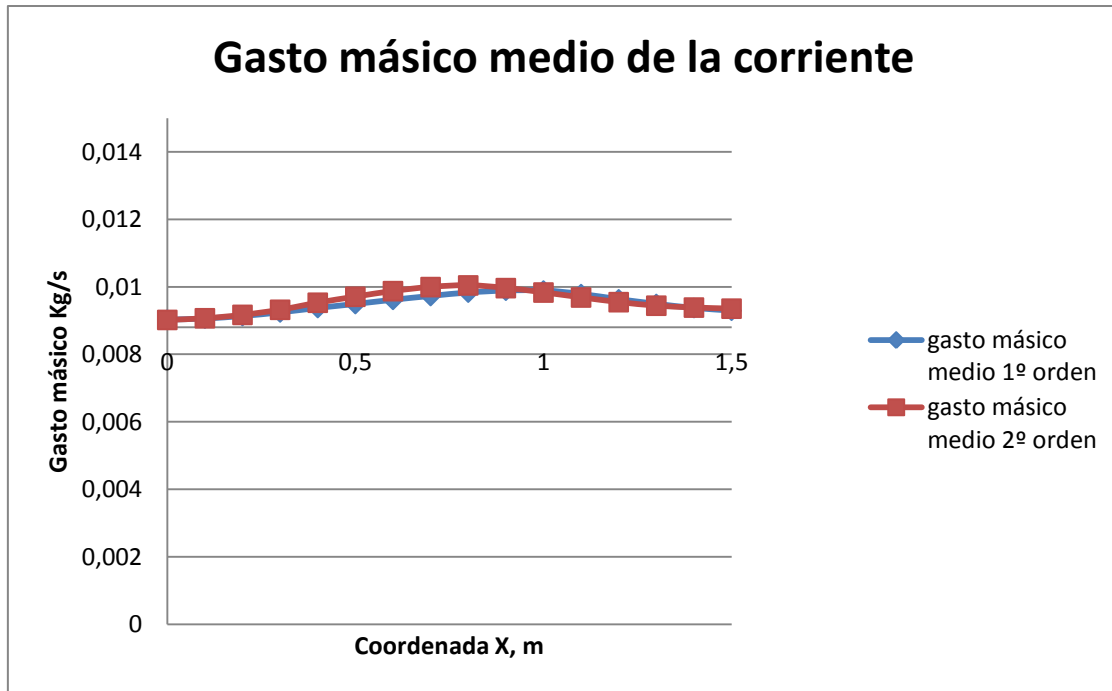
El error obtenido por exceso es de:

$$e(\text{exceso}) = \frac{0.01004 - 0.00956}{0.01004} = 0.0478 = 4.8\% \quad (3.11)$$

Y el error que se obtiene por defecto del gasto másico es de:

$$e(\text{defecto}) = \frac{|0.00902 - 0.00956|}{0.00902} = 0.0059 = 0.59\% \quad (3.12)$$

Los errores obtenidos son bastante pequeños y se puede observar en la figura 3.17 como los valores de los gastos másicos de las 15 secciones estudiadas son muy parecidos los unos de los otros, siendo en las regiones centrales del colector donde se obtiene valores algo superiores a los esperados antes de la simulación.



- 26.Figura 3.17 Gasto medio de la corriente.

Se puede observar en la gráfica anterior como los valores en 1º orden y 2º orden de precisión son similares. A partir de aquí, las gráficas obtenidas serán siempre con 2º orden upwind, para que la lectura de las mismas sea más fácil.

3.1.1 ESTUDIO DE LA VELOCIDAD DE ENTRADA

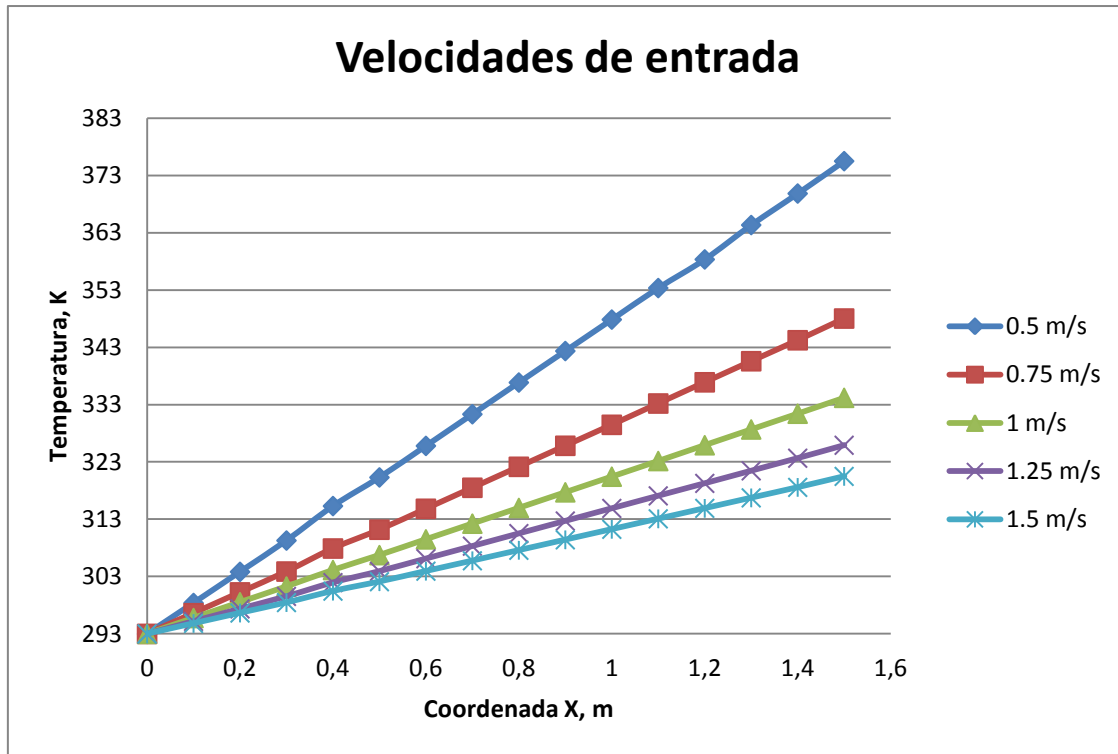
Un parámetro que se puede elegir en una instalación como la que se está estudiando es la velocidad de entrada de la corriente. En convección forzada, la velocidad inicial del fluido nos la suministra un ventilador que se coloca al comienzo del captador.

Se puede calcular los errores que se cometen al hacer la simulación con Fluent, y se comprobará como estos errores son pequeños. Como se ha comentado la temperatura a la salida del captador sigue la siguiente ley.

$$T_s = T_e + \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (3.13)$$

Las velocidades de entrada que se estudiarán serán las de 0.5m/s, 0.75m/s, 1m/s, 1.25m/s y 1.5m/s.

3. Modelo simulado



- 27.Figura 3.18 Estudio según la velocidad de entrada.

Como se ha demostrado la temperatura a la salida del captador solar se realizará del siguiente modo:

$$T_s (v = 1m / s) = T_e + \frac{\dot{Q}_{in}}{m \cdot c_p} = 20^{\circ} C + \frac{1000W / m^2 \cdot 0.25m \cdot 1.5m}{1m / s \cdot 1.1618kg / m^3 \cdot 0.25m \cdot 0.03m \cdot 1004J / kg \cdot K} = 62.84^{\circ} C$$

$$T_s(v=1m/s) = 335.84K$$

A continuación se muestra los errores cometidos para las 5 velocidades elegidas. El flujo de calor suministrado por la superficie inferior será constante y de valor 1000 W/m²:

3. Modelo simulado

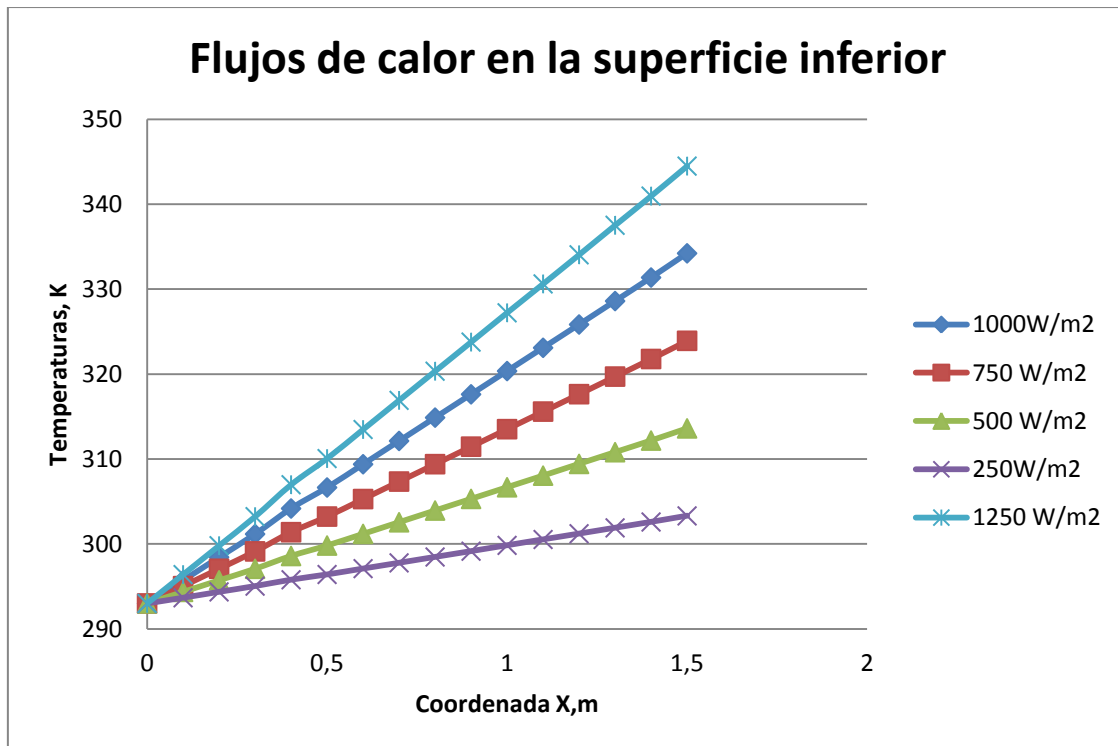
Velocidades	T _s (calculada)	T _s (Fluent)	Error
0.5m/s	378.68	375.51	0.83%
0.75m/s	350.12	348.04	0.59%
1m/s	335.84	334.23	0.48%
1.25m/s	327.27	325.92	0.41%
1.5m/s	321.56	320.49	0.33%

Tabla 2:3.1 Estudio de la temperatura a la salida con un flujo de calor de 1000W/m².

En la tabla se puede comprobar como el modelo simulado en Fluent es más preciso para velocidades de la corriente más altas. Sin embargo, el error cometido en las 5 simulaciones está por debajo del 1% por lo que se consideran valores fiables.

3.1.2 ESTUDIO DEL FLUJO DE CALOR EN LA CARA INFERIOR

El estudio se realizará para la velocidad de 1 m/s. Y los valores serán de 250 W/m², 500W/m², 750W/m², 1000W/m² y 1250W/m².



- 28.Figura 3.19: Estudio según el flujo de calor.

3. Modelo simulado

Anteriormente se ha demostrado la temperatura a la salida del captador solar se obtendrá como sigue:

$$T_s(v = 1m/s) = T_e + \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m} \cdot c_p} = 20^\circ C + \frac{1000W/m^2 \cdot 0.25m \cdot 1.5m}{1m/s \cdot 1.1618kg/m^3 \cdot 0.25m \cdot 0.03m \cdot 1004J/kg \cdot K} = 62.84^\circ C$$

$$T_s(v=1m/s) = 335.84K$$

A continuación se muestra los errores cometidos para los 5 flujos de calor simulados para una velocidad de entrada de 1m/s.

Flujos de calor	T _s (calculada)	T _s (Fluent)	Error
250W/m ²	303.71	303.31	0.13%
500W/m ²	314.42	313.61	0.26%
750W/m ²	325.13	323.92	0.37%
1000W/m ²	335.84	334.22	0.48%
1250W/m ²	346.55	344.49	0.59%

Tabla 3: 3.2 Estudio de la temperatura de salida a una velocidad de entrada de 1 m/s.

Se puede comprobar que los errores cometidos son menores del 1%, por lo que se consideran resultados de la temperatura de salida correctos. También se puede observar que cuando el flujo de calor introducido por la placa de acero inferior es pequeño, el resultado es más próximo al calculado realizando balances de energía.

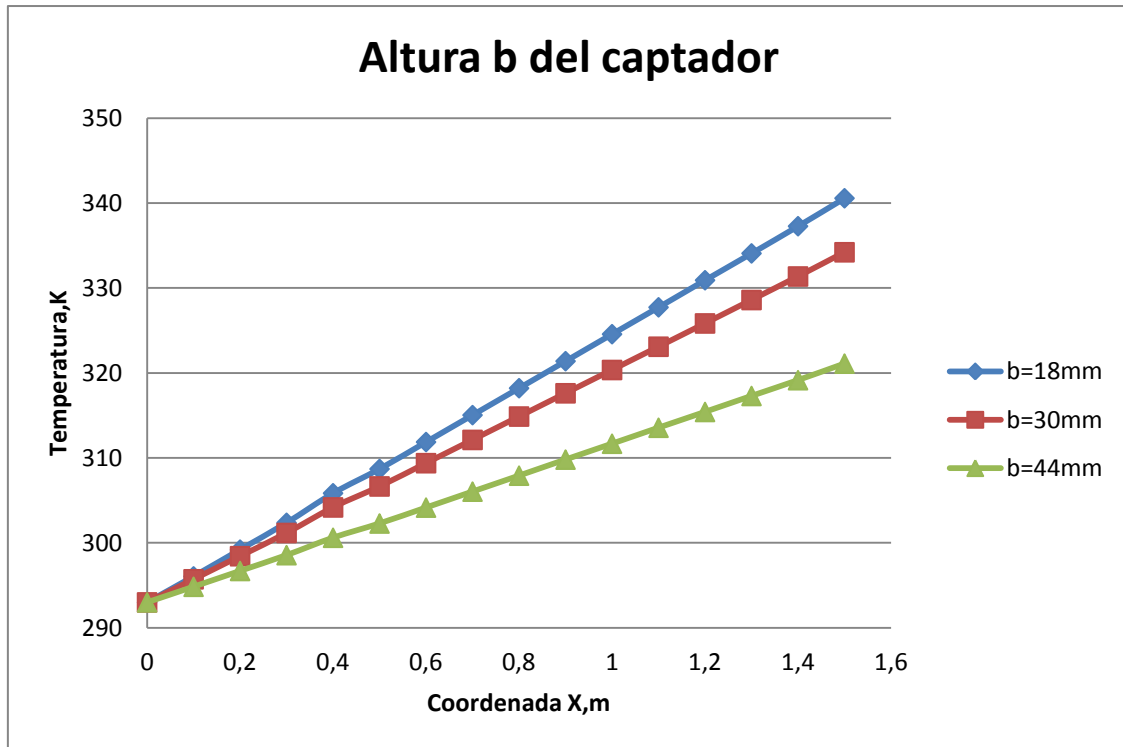
3.1.3 ESTUDIO DE LA GEOMETRÍA

Para el estudio de la geometría se ha decidido realizar una malla con más nodos que la utilizada hasta ahora, ya que en el modelo nominal se realizará un mallado exhaustivo en el apartado 3.1.4.

Para b= 18 mm tenemos 54964 nodos.

Para b = 44 mm tenemos 47122 nodos.

3. Modelo simulado



- 29.Figura 3.20 Estudio según la altura b del captador.

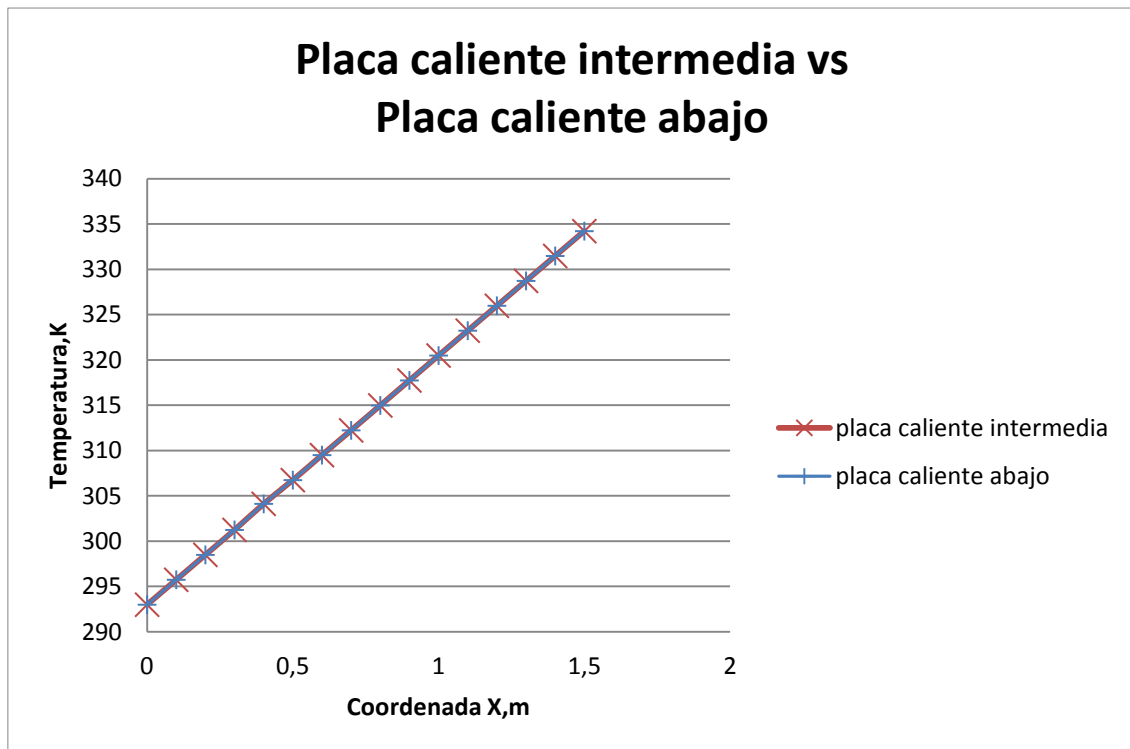
Altura b (m)	$T_s(\text{calculada})$	$T_s(\text{Fluent})$	Error
0.018	364.41	340.55	6.40%
0.03	335.84	334.22	0.48%
0.044	322.21	323.50	0.42%

Tabla 4: 3.3 Estudio de la temperatura de salida a una velocidad de entrada de 1m/s y 1000 W/m².

Se puede observar como el error para una altura del captador pequeña, de 18 mm, es bastante grande un 6.40%. Este resultado no se considerará adecuado.

PLACA CALIENTE DE ACERO EN EL MEDIO DEL CAPTADOR

En este apartado se va a estudiar la importancia o no de colocar la placa caliente en el medio del captador, es decir, a una distancia de 0.015m de altura en lugar de colocarla en el suelo, a una distancia de 0m. Se podría prever que la corriente alcance la misma temperatura al final del captador, ya que en ambas situaciones se está introduciendo la misma cantidad de calor, que son los 1000W/m². Lo mejor en estos casos es realizar una comparación de ambos procesos, y esto se puede ver en la figura 3.21.

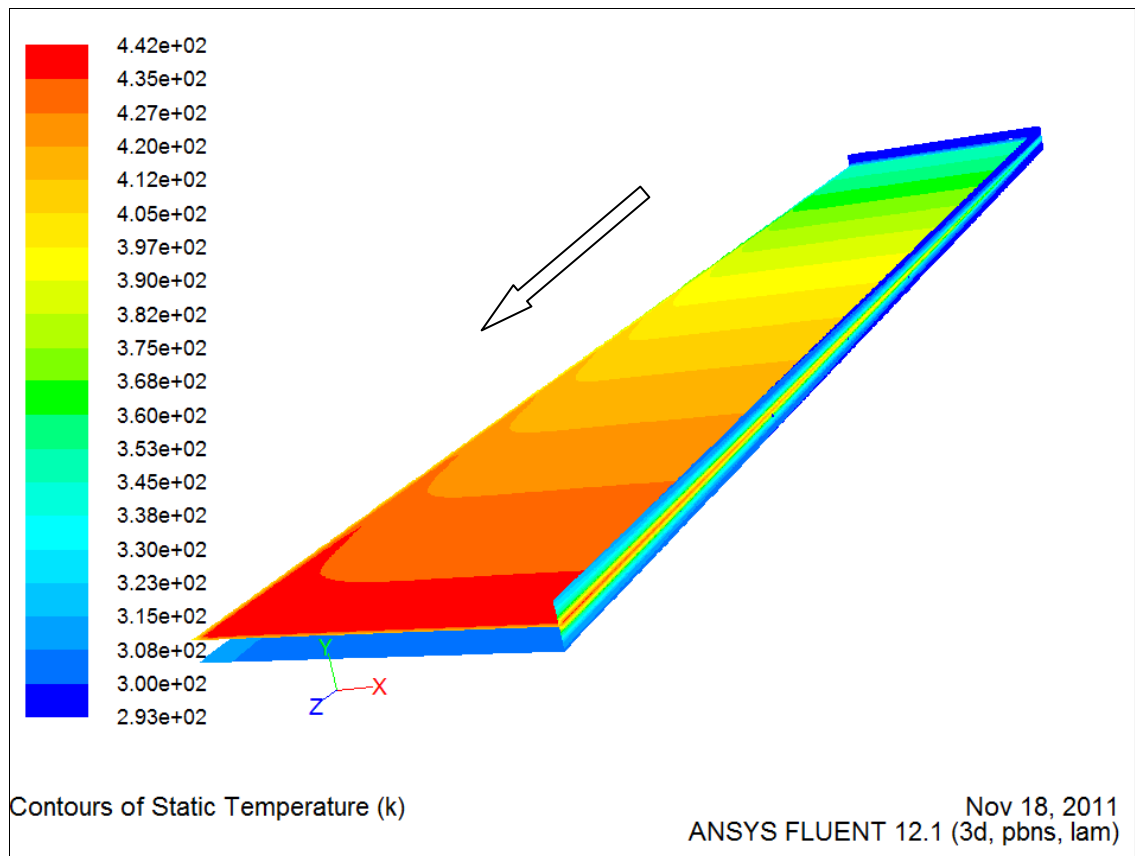


- 30.Figura 3.21 Placa caliente intermedia Vs Placa caliente abajo.

En la figura 3.21 se puede comprobar cómo las temperaturas alcanzadas en cada división del captador son iguales, luego la geometría no influye en la temperatura, al menos en convección forzada.

Por otro lado, podría resultar interesante realizar un corte al captador solar en la cara simétrica para ver la evolución de temperaturas a lo largo del captador, porque aunque la media de temperaturas en cada división ortogonal a la corriente sea semejante, la distribución debe ser diferente por el hecho de tener una geometría distinta. Y esto se puede comprobar en las figuras 3.22 y 3.23.

3. Modelo simulado

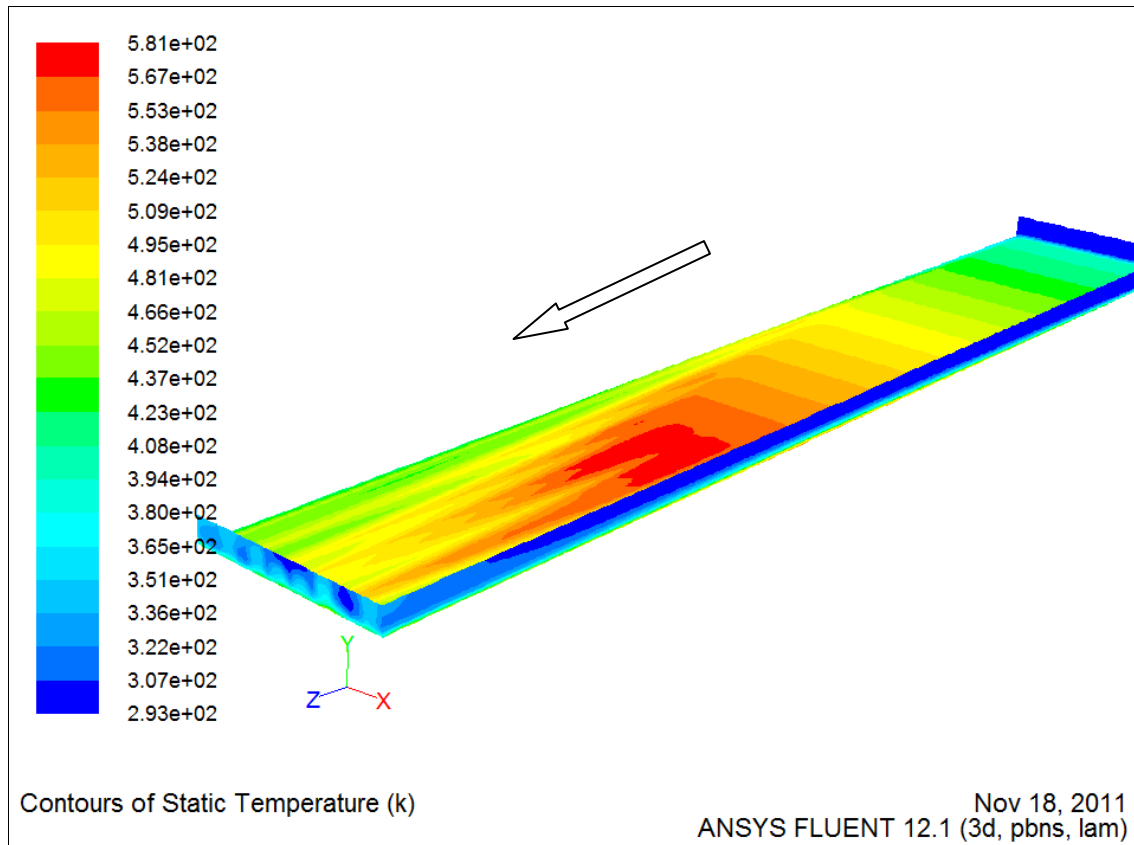


- 31.Figura 3.22 Estudio de temperaturas. Placa caliente intermedia.

En la figura 3.22 Se comprueba como la cara caliente se encuentra a una altura de $y = 0.015$ m, es decir, en el medio del captador solar. Por este motivo, los 1000 W/m^2 deben dividirse de manera ecuánime entre la parte superior y la parte inferior. Queda así dividido el flujo en dos regiones que absorben 500 W/m^2 cada una.

En una situación ideal si la corriente se divide en 2 y el calor aportado a ella también se divide entre dos, llegará al final del proceso con la misma temperatura de salida.

3. Modelo simulado



- 32.Figura 3.23 Estudio de temperaturas. Placa caliente abajo.

En la figura 3.23 Se puede observar que la placa caliente se encuentra a una altura de $y = 0$ m, es decir se encuentra colocada en la parte inferior. De este modo tenemos una corriente con el doble de flujo másico que la anterior, pero con el doble de potencia térmica. La corriente absorberá 1000 W/m^2 .

El resultado en términos de temperatura es idéntico en ambos casos, pero se puede observar a simple vista mirando la cara simétrica cómo en el caso de colocar la placa caliente en el interior del captador se reduce el color azul oscuro (que indica 293K, que es la temperatura de entrada) por lo que esta disposición geométrica parece más adecuada en el caso de realizar un experimento y no una simulación, como es en este caso, ya que parece que el flujo es más uniforme en cuanto a las temperaturas y para algunas situaciones puede ser importante conseguir un flujo de corriente con temperatura uniforme.

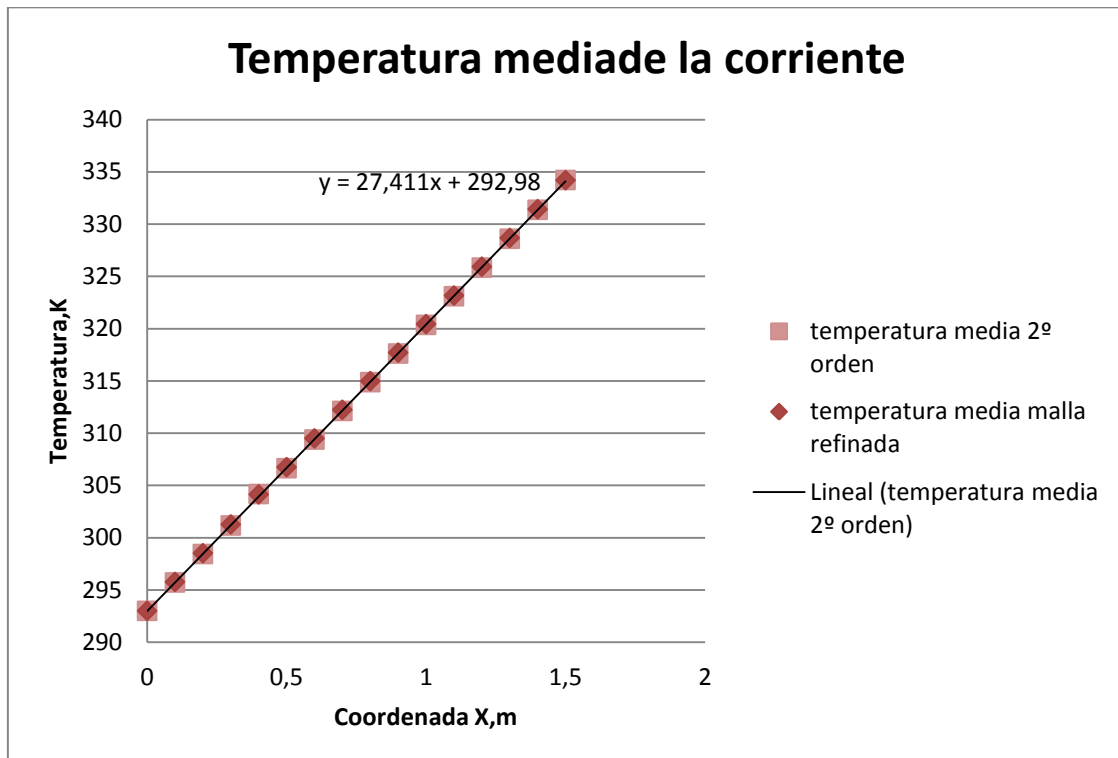
3.1.4 ESTUDIO DEL MALLADO EN LA SOLUCIÓN

En este apartado se va a mallar de una manera exhaustiva, es decir, se va a refinar la malla en las 3 direcciones espaciales. Cada celda se va a dividir en 2 en cada dirección espacial. El tiempo de procesamiento del sistema se alarga de una manera clara,

3. Modelo simulado

pero es siempre necesario en cualquier estudio ingenieril acabar con este apartado. Cuando los resultados llegan a no depender de la malla cuando se refina, se habrán alcanzado unos datos que pueden ser correctos.

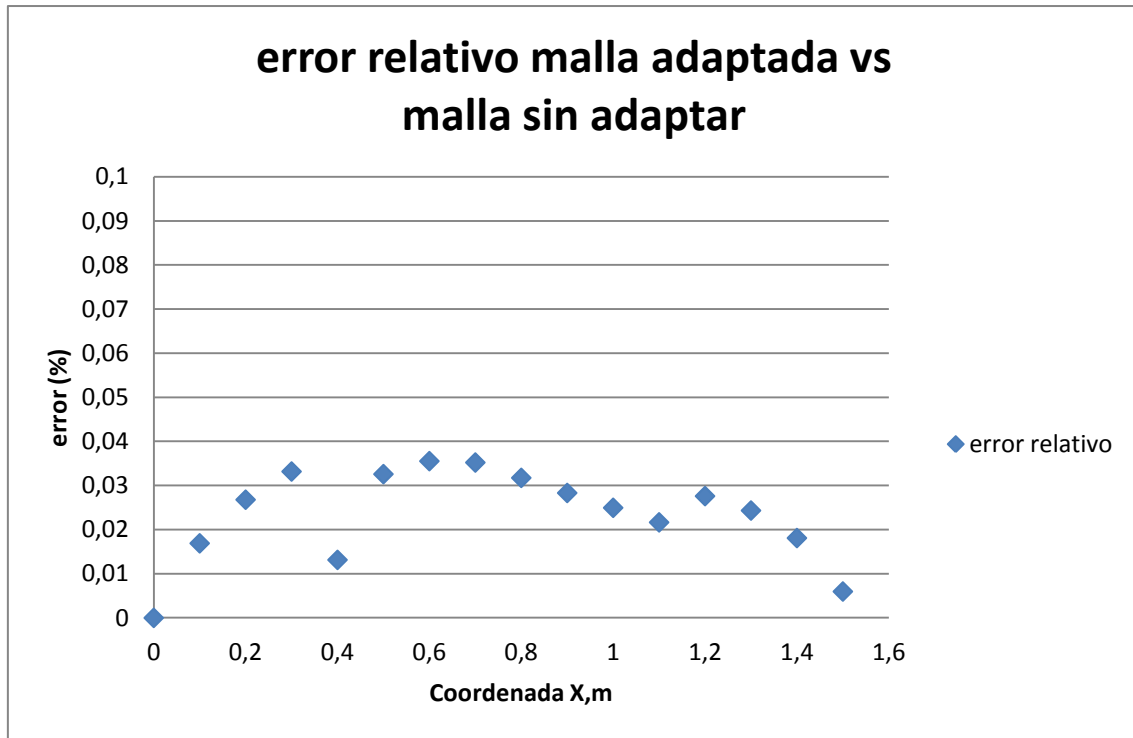
En el caso de estudio, se han pasado de tener 22500 celdas a 180000 y de 27482 nodos a 199563. Pero como se puede observar en la siguiente figura, los resultados coinciden, son prácticamente iguales con la malla adaptada y la original.



- 33.Figura 3.24 Comparación malla refinada y sin refinar.

En la figura 3.24 se puede observar como los resultados con la malla refinada coinciden prácticamente con los datos obtenidos con la malla estándar de 27482 nodos. La temperatura media en cada plano perpendicular al flujo de la corriente es similar para la malla refinada y la malla sin refinar.

Los resultados de temperatura se solapan observando la gráfica. Pero puede ser importante cuantificar cuanto se parecen los datos, para ello recurriremos al error relativo entre ambas mallas:



- 34.Figura 3.25 Comparación malla refinada y sin refinar (2).

En la figura 3.20 se puede comprobar cómo el error relativo es muy pequeño, no superando el 0.04% en ninguna parte del captador solar. De esta forma queda demostrada la independencia de la malla en el resultado de las temperaturas medias.

3.2 MODELO NOMINAL CONVECCION LIBRE

En el modelo de convección libre no existe una velocidad forzada como existía en convección forzada. Ocurre cuando las diferencias de densidad son las que hacen que el fluido se mueva. Y para que existan diferencias de densidades, ha de haber un gradiente de temperaturas que la originen.

El flujo de aire en convección libre normalmente tiene una velocidad menor que en convección forzada, luego el ratio de transferencia de calor por convección normalmente será menor. Sin embargo, la convección libre es importante en muchos procesos, como puede ser la pérdida de calor de una tubería ubicada en el exterior, o el estudio de cómo refrigerar bien elementos electrónicos. También es importante su estudio en la naturaleza, ya que la convección libre es la responsable de grandes movimientos del agua en los océanos y de ciertos movimientos del aire en la atmósfera.

3. Modelo simulado

La forma de resolver el modelo en convección libre es más complicada que con convección forzada. Es necesario un tiempo de computación mayor, y la convergencia del sistema es más compleja.

El cambio más importante que se ha realizado en Fluent es el de las condiciones de contorno a la entrada y a la salida del captador. En este caso no se han elegido velocityinlet y pressureoutlet, sino pressureinlet y pressureoutlet, ya que no se sabe la velocidad de entrada de la corriente, es un dato desconocido.

Además la densidad del fluido, es decir del aire, en estos casos no es constante, y se ha decidido utilizar el modelo de Boussinesq, que es el que mejor se ajusta para convección natural según las bibliografías consultadas. En este modelo la densidad varía en función del gradiente de temperaturas que se alcanza en el interior del captador solar, y el gradiente de densidad provoca un movimiento ascendente de la corriente de aire.

Como se puede observar en la figura 3.26, en este caso no se ha puesto 1000W/m^2 en la cara inferior del captador desde el principio, sino que se ha ido aumentando desde 50 W/m^2 en 100W/m^2 hasta llegar a los 1000W/m^2 . El motivo es la mejora de la convergencia de esta forma.

Captador con inclinación de 15° .

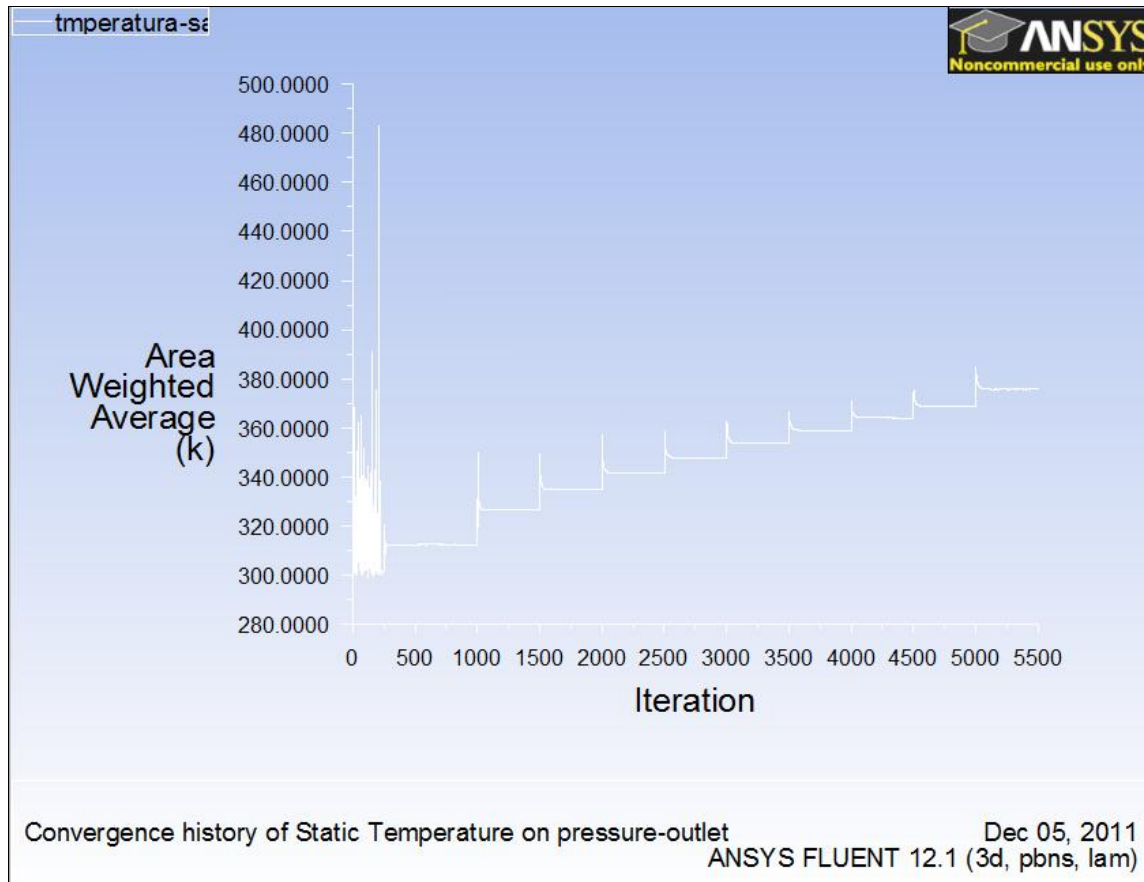
Para el estudio del captador solar en convección natural, el estudio en Fluent se realizará del siguiente modo: en primer lugar, se coloca el captador sin inclinación, es decir, se rota la malla 0° . Y se realizan las primeras 250 iteraciones.

Como se puede observar en la figura 3.26, se ha elegido comprobar instantáneamente la temperatura de salida de la corriente. Con una inclinación de 0° , el sistema es muy inestable, ya que se crean recirculaciones que son muy difíciles de tratar para el programa Fluent, y esto hace que la temperatura nunca se estabilice.

Desde las 250 hasta las 1000 iteraciones, se rota la malla 15° , y en las condiciones de contorno se escoge 50 W/m^2 de flujo de calor en la cara inferior del captador solar. Como resultado se tiene una temperatura de salida de unos 310 K muy estable.

Los siguientes pasos son aumentar el flujo de calor de 50 a 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850 y finalmente 1000 W/m^2 en la cara inferior del captador solar. El resultado obtenido de temperatura final se puede ver en la figura 3.26 y es de 374.72 K a una velocidad de 0.5245 m/s .

3. Modelo simulado



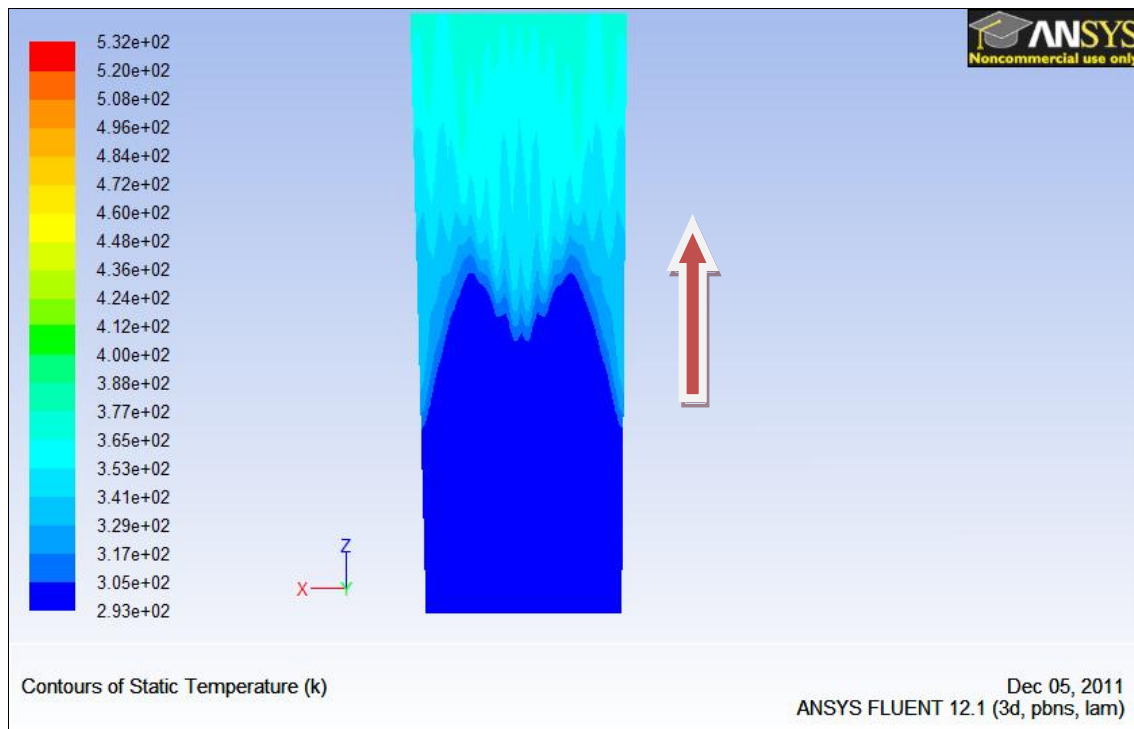
- 35.Figura 3.26 Temperatura de salida de la corriente en función del flujo de calor en la cara inferior.

En la figura 3.27 se tiene la vista superior del captador y es fácil ver por la diferencia de colores como la parte superior del captador se da cuenta de que la temperatura aumenta en el interior del captador aproximadamente en $Z = 0.75$ m, es decir, aproximadamente en la mitad de éste.

A medida que se vaya aumentando la inclinación, se puede observar como la parte de la cara superior que aumenta la temperatura se va haciendo menor. Esto se debe a que la proyección vertical si el captador tiene un ángulo de 15° es mayor que si el ángulo es 30° o 45° . Por ello el fluido pasa más tiempo en el interior y se calienta más. Y por diferencia de densidades este aire tiende a subir y provoca un aumento de temperatura en la cara superior.

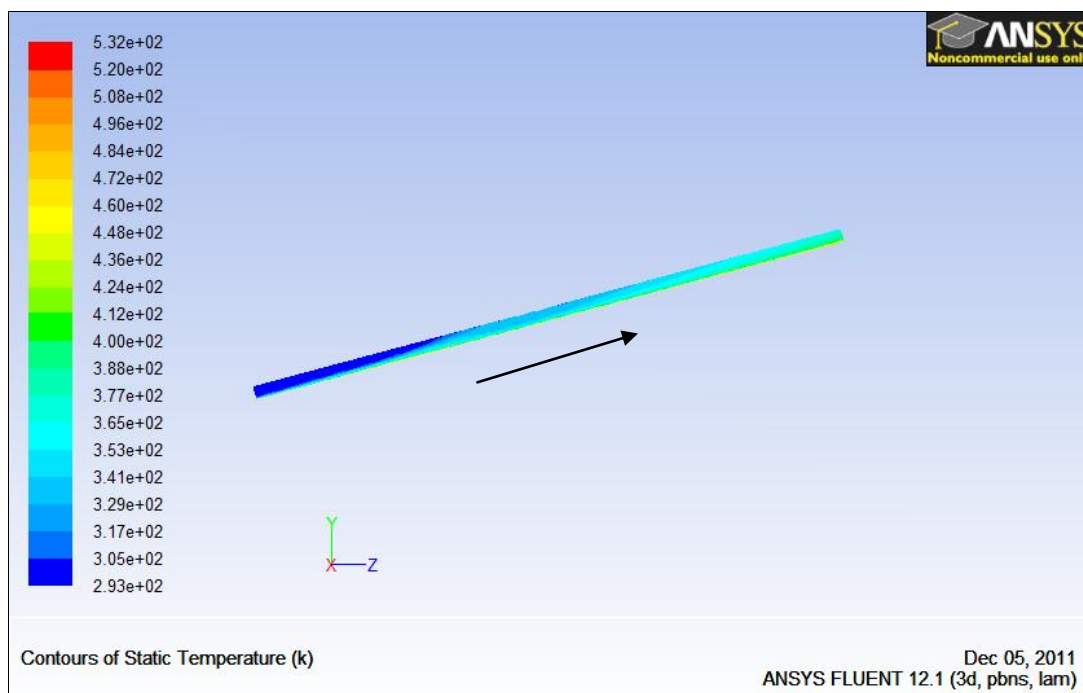
La flecha indica la dirección y el sentido de la corriente de aire en el interior del captador solar.

3. Modelo simulado



- 36.Figura 3.27 Vista superior del captador para una inclinación de 15°.

En la figura 3.28 se puede observar desde el lateral como la placa caliente inferior provoca que se caliente el aire y éste sube por diferencia de densidades. Tanto en la figura como en la figura, se aprecia que la mezcla de aire frío en la entrada con el caliente se produce cerca de la entrada, a una profundidad Z de menos de la mitad.

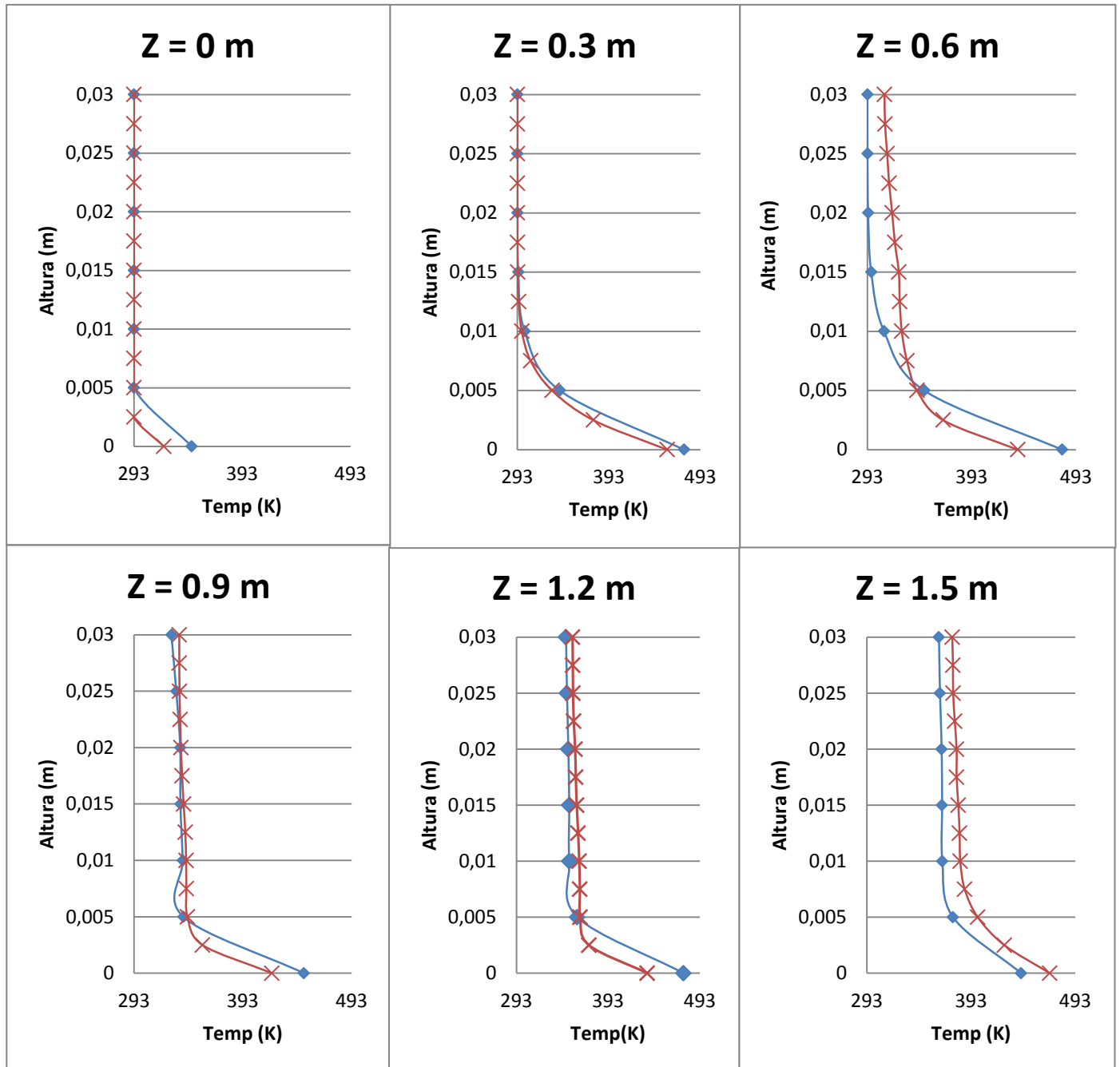


- 37.Figura 3.28 Vista lateral del captador para una inclinación de 15°.

3. Modelo simulado

En la figura 3.29 se puede comprobar la distribución de temperaturas en 6 puntos del captador. Se puede observar como en $Z = 0$ m, toda la corriente tiene un valor de 293k ya que a la entrada escogimos esa condición de contorno. Sólo el nodo que se encuentra a una altura $Y = 0$ m tiene una temperatura superior, debido a que en ese punto se encuentra la placa caliente que suministra 1000W/m^2 .

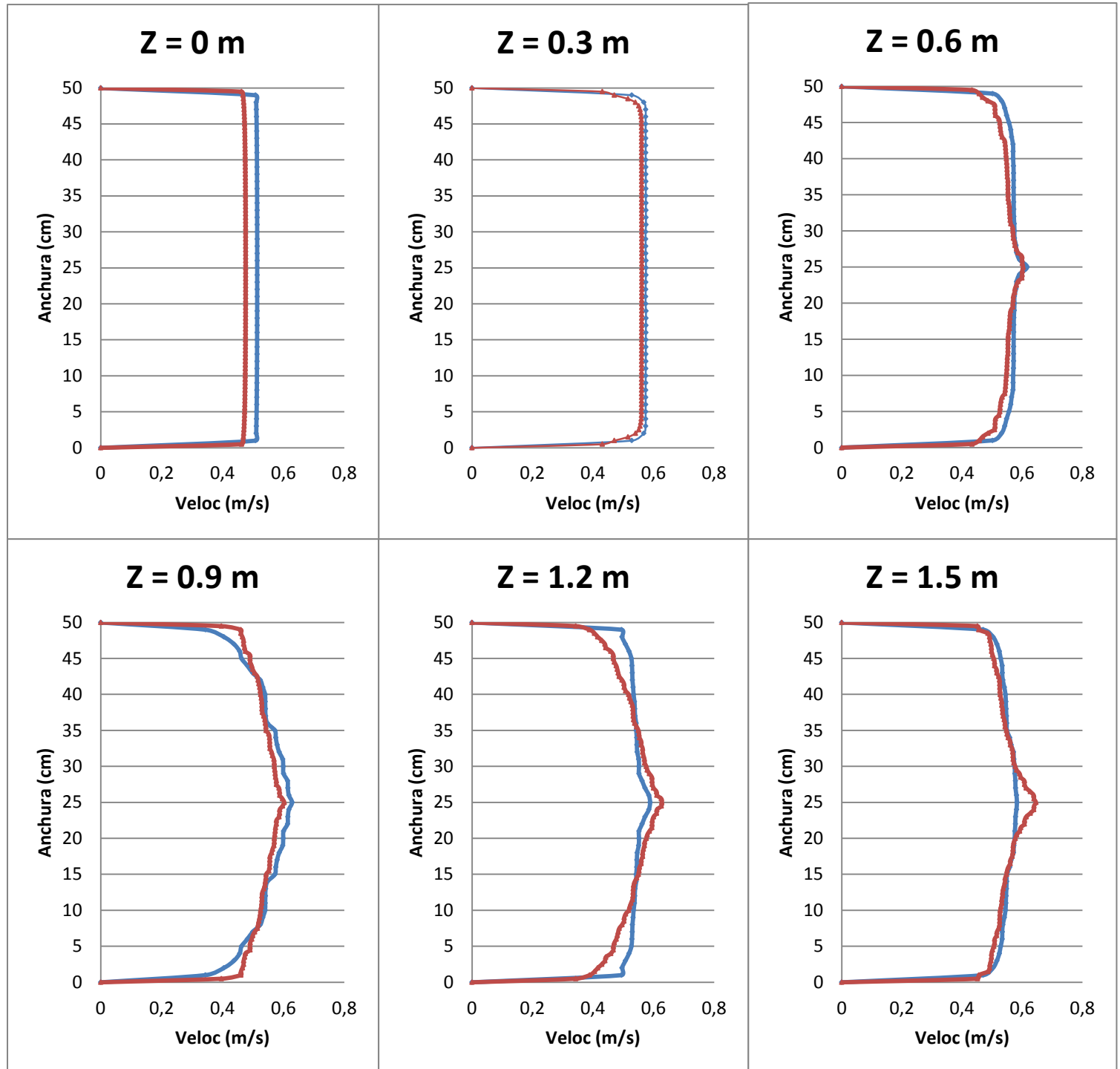
A medida que se avanza por el captador, $Z = 0.3$, $Z = 0.6$, $Z = 0.9$ y $Z = 1.2$ m, se observa como los valores se alejan del eje de ordenadas. Esto quiere decir que toda la corriente de aire se está calentando y en $Z = 1.5$ m es donde se obtiene la temperatura más uniforme, puesto que la línea es más vertical.



- 38.Figura 3.29 Distribución de temperaturas de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo $=15^\circ$.

3. Modelo simulado

En la figura 3.30 se han obtenido los perfiles de velocidad de la corriente para 6 puntos del interior del captador solar. Se puede observar cómo evoluciona desde un perfil uniforme en $Z = 0$ m y $Z = 0.3$ m hasta un perfil donde la velocidad es mayor en el centro del captador. Una velocidad media aproximada de la corriente es de 0.5 m/s, que es del orden de lo que dice las bibliografías, punto 2.2.2.



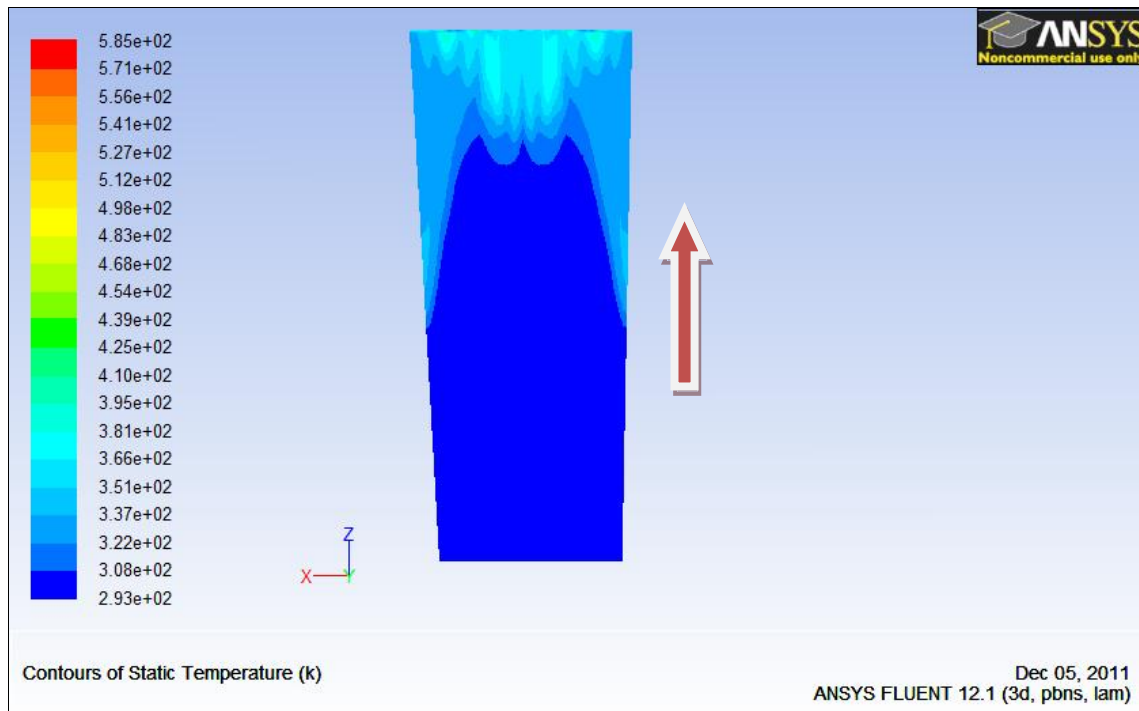
- 39.Figura 3.30 Distribución de velocidades de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo $=15^\circ$.

3. Modelo simulado

Captador con inclinación de 30°.

El modelo con inclinación de 30° ha sido más difícil de convergir que el modelo con una inclinación de 15°. Pero el modo que se ha conseguido ha sido muy similar, empezando con 50 W/m², 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850 y acabando en 1000 W/m². En ese momento se han obtenido los valores puntuales de velocidad y temperatura para el estudio a fondo del modelo, y acto seguido se ha refinado el mallado, obteniendo los mismos valores.

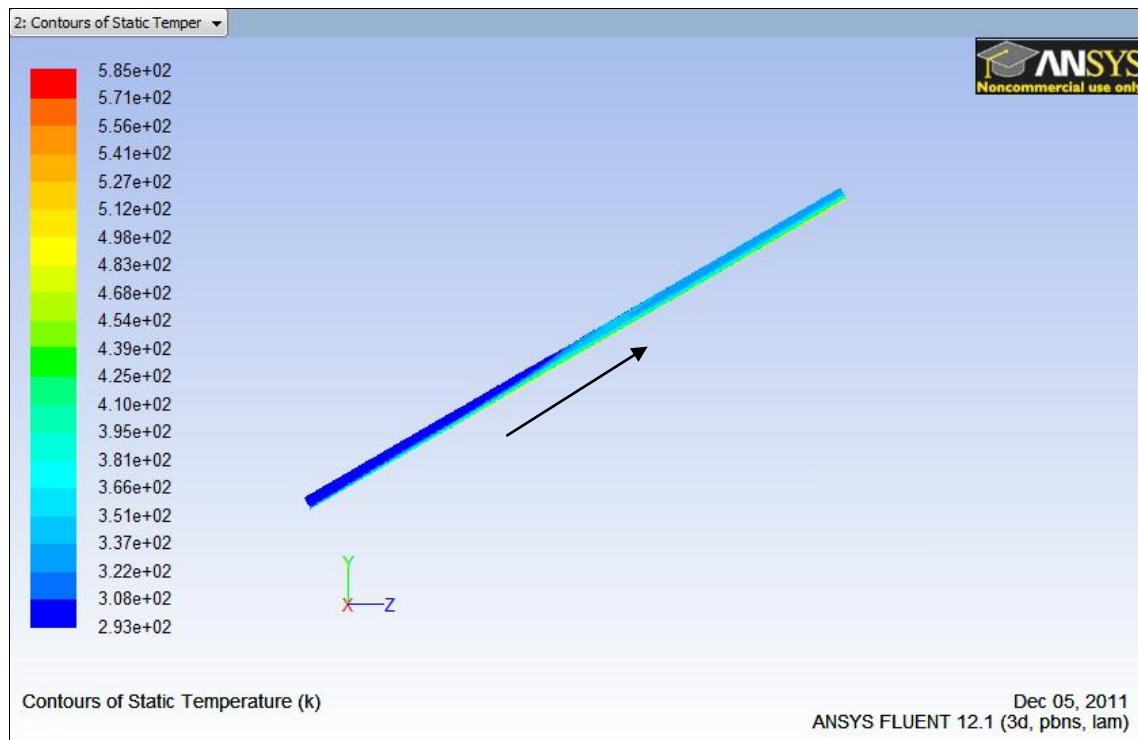
En la figura 3.31 se ha obtenido la cara superior del captador, observándose como la mezcla del fluido caliente con el frío se ha dado casi al final del captador. Esto es debido a que la proyección vertical para 30° es menor que para 15°, es decir que $1.5m \cdot \cos(30) < 1.5m \cdot \cos(15)$.



- 40.Figura 3.31 Vista superior del captador para una inclinación de 30°.

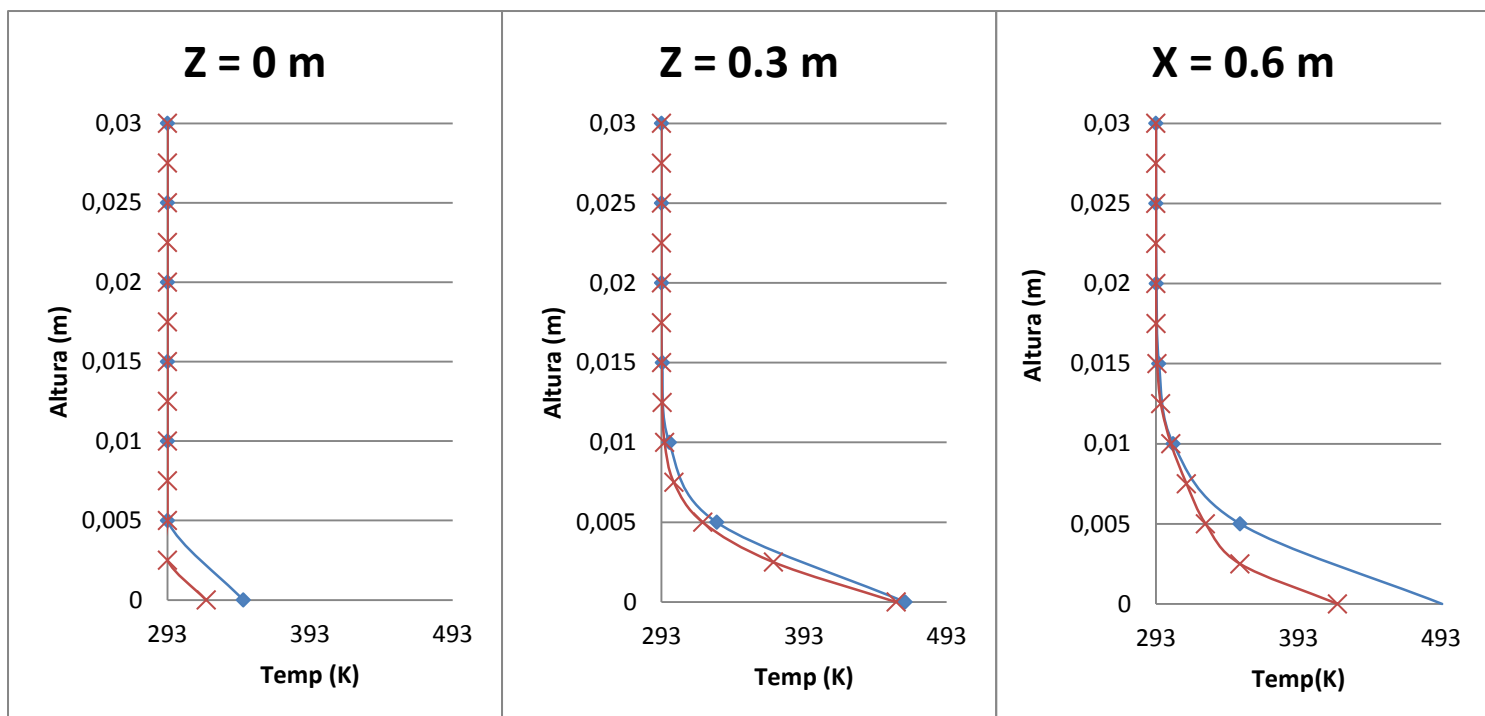
Este hecho se puede observar también en la cara lateral del captador. Se comprueba como la parte azul oscura (que representa temperaturas bajas, cercanas a 293K) se adentra más en el interior que cuando se estudiaba el captador con inclinación de 15°. Véase la figura 3.32.

3. Modelo simulado

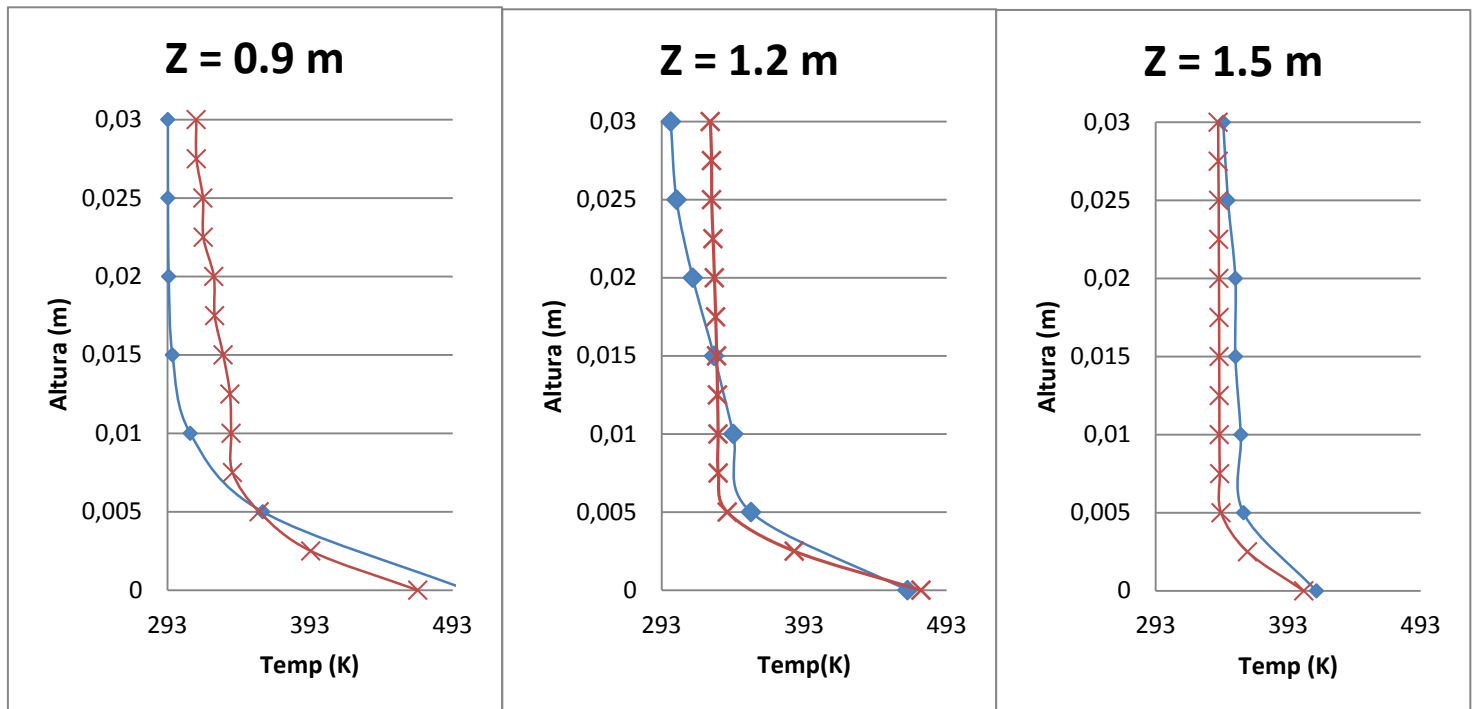


- 41.Figura 3.32 Vista lateral del captador para una inclinación de 30°.

En la figura 3.32 se comprueba que la distribución de temperatura es bastante uniforme tanto en la entrada como en la salida. También se comprueba que en la parte inferior para cualquier profundidad se obtiene temperaturas más altas, ya que ahí está colocada la plancha metálica que irradia 1000 W/m^2 . Después, por diferencia de densidad, el aire caliente tiende a subir y se van equiparando los valores a medida que se avanza en el captador. Para $Z = 1.5\text{m}$ se obtiene una distribución de temperatura bastante uniforme.



3. Modelo simulado

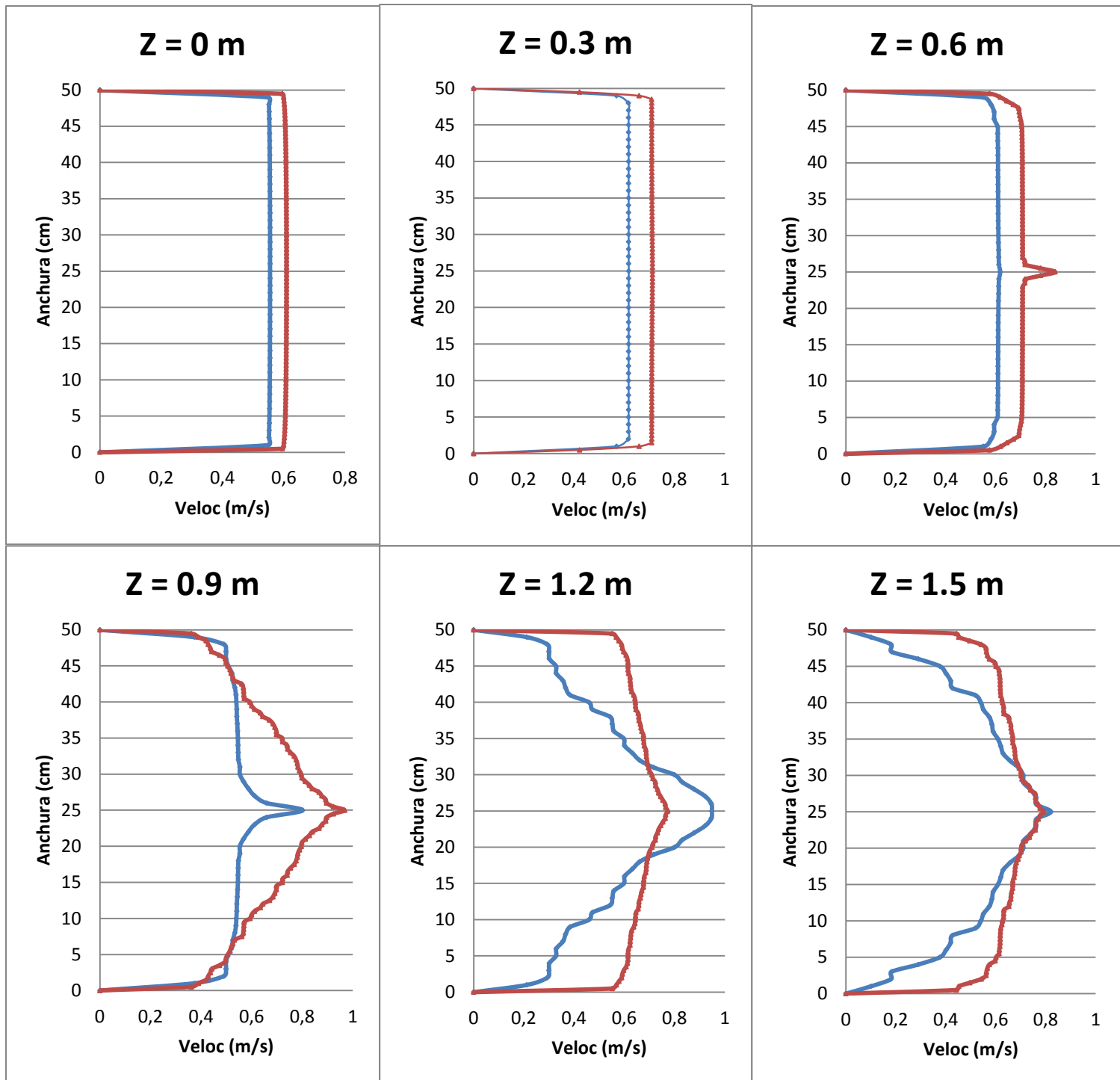


- 42.Figura 3.33 Distribución de temperaturas de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =30°.

La distribución de velocidades para $Z = 0$, $Z = 0.3$ y $Z = 0.6$ m es bastante uniforme. Una vez pasado la mitad del captador, se hace evidente que la corriente se acelera en la parte central del captador, y es ahí donde se dan velocidades mayores llegando a haber una diferencia importante. Mientras que en el centro se alcanzan velocidades cercanas a 1m/s, en las paredes obviamente 0m/s.

Pero en puntos muy próximos a la pared, la velocidad es de sólo 0.4 m/s, existiendo un gradiente importante con el centro del captador (1m/s). Este comentario se aprecia muy bien para la malla refinada en la figura 3.34 (para $Z=1.5$ m).

3. Modelo simulado



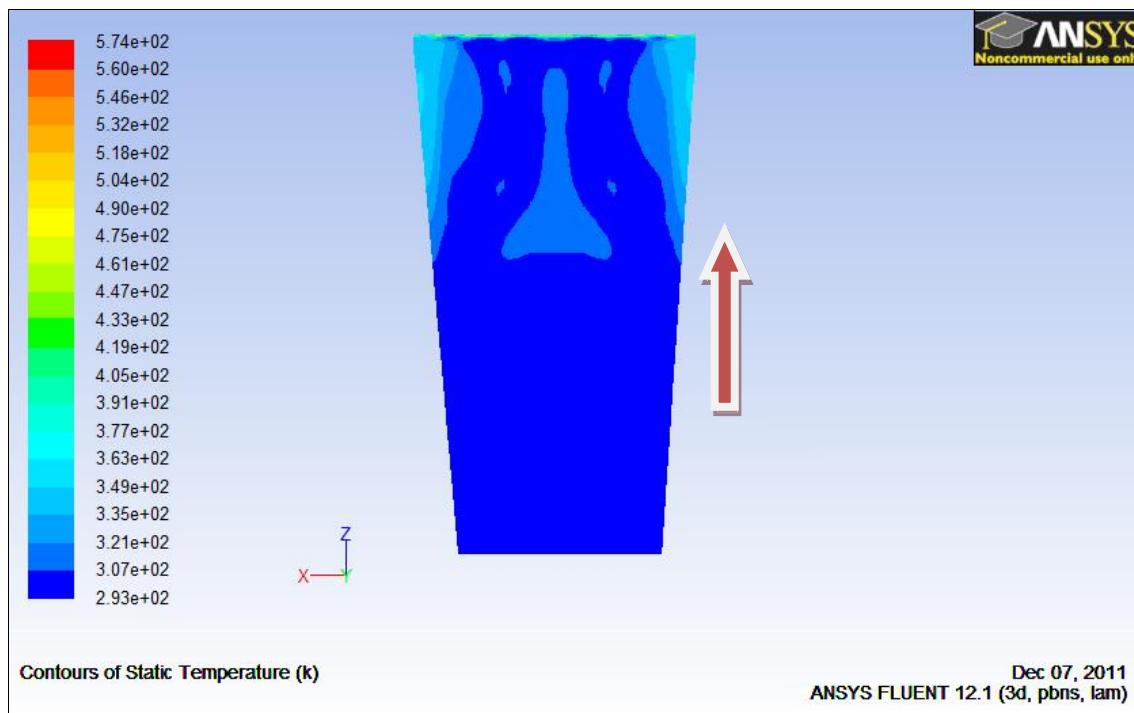
- 43.Figura 3.34 Distribución de velocidades de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo $\approx 30^\circ$.

3. Modelo simulado

Captador con inclinación de 45°.

La convergencia del captador cuando su inclinación era de 45° ha sido más compleja aun que cuando estaba a 30°. El sistema se hacía bastante inestable a medida que se aumentaba el flujo de calor desde 50 hasta 1000W/m² de una manera gradual, similar a las que permitieron obtener los resultados de los apartados anteriores para una inclinación de 15 y de 30°.

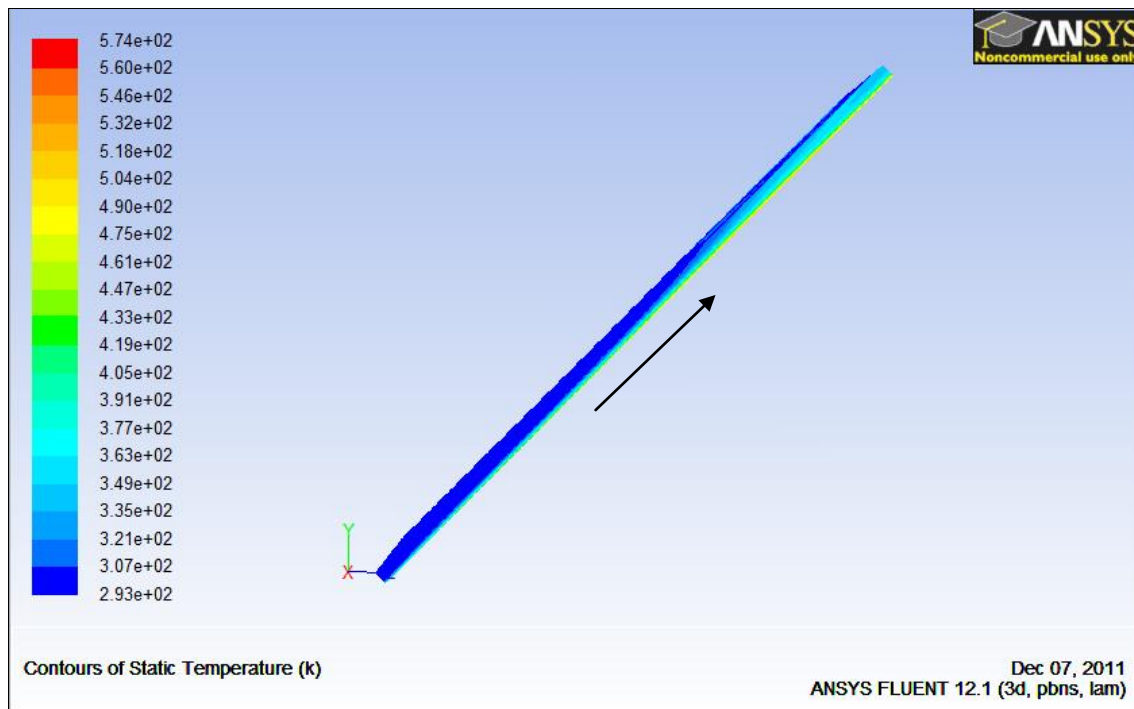
En la figura, se ve como el fluido recircula y se crean remolinos. Por ello es más complicada su convergencia. Se aprecia en la vista superior como casi toda la cara de arriba conserva el color azul oscuro, que quiere decir que la cara conserva la temperatura inicial de 293k, es decir, no se ha calentado o lo ha hecho de una manera no muy importante.



- 44.Figura 3.35 Vista superior del captador para una inclinación de 45°.

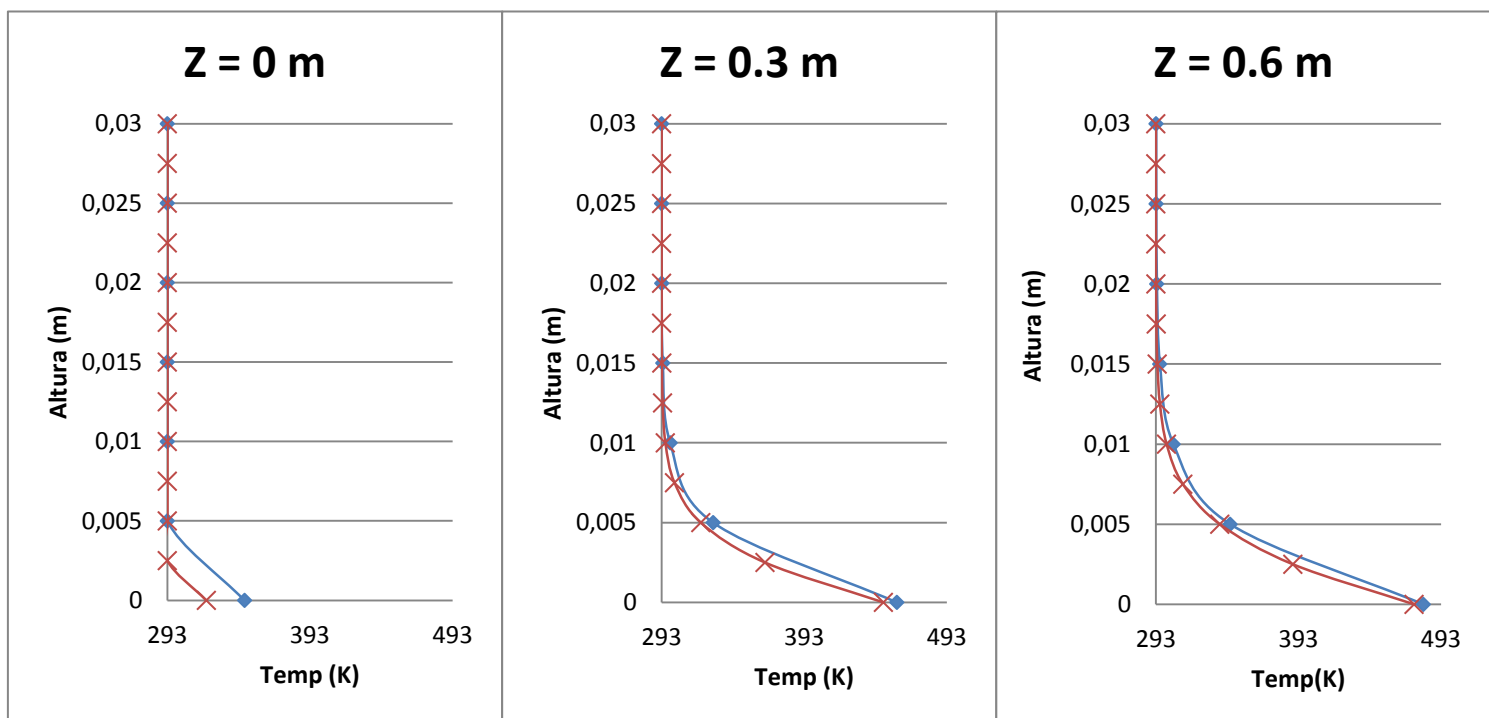
En la figura 3.35 y en la 3.36 se ve que al aumentar la inclinación, el fluido tiene menos distancia para interactuar con la placa metálica caliente inferior, y acto seguido subir por diferencias de flotabilidad. Por ello se observa que la mayor parte del fluido del captador solar se representa con un color azul oscuro, es decir, está a una temperatura baja, próxima al valor que tenía a la entrada, 293k.

3. Modelo simulado

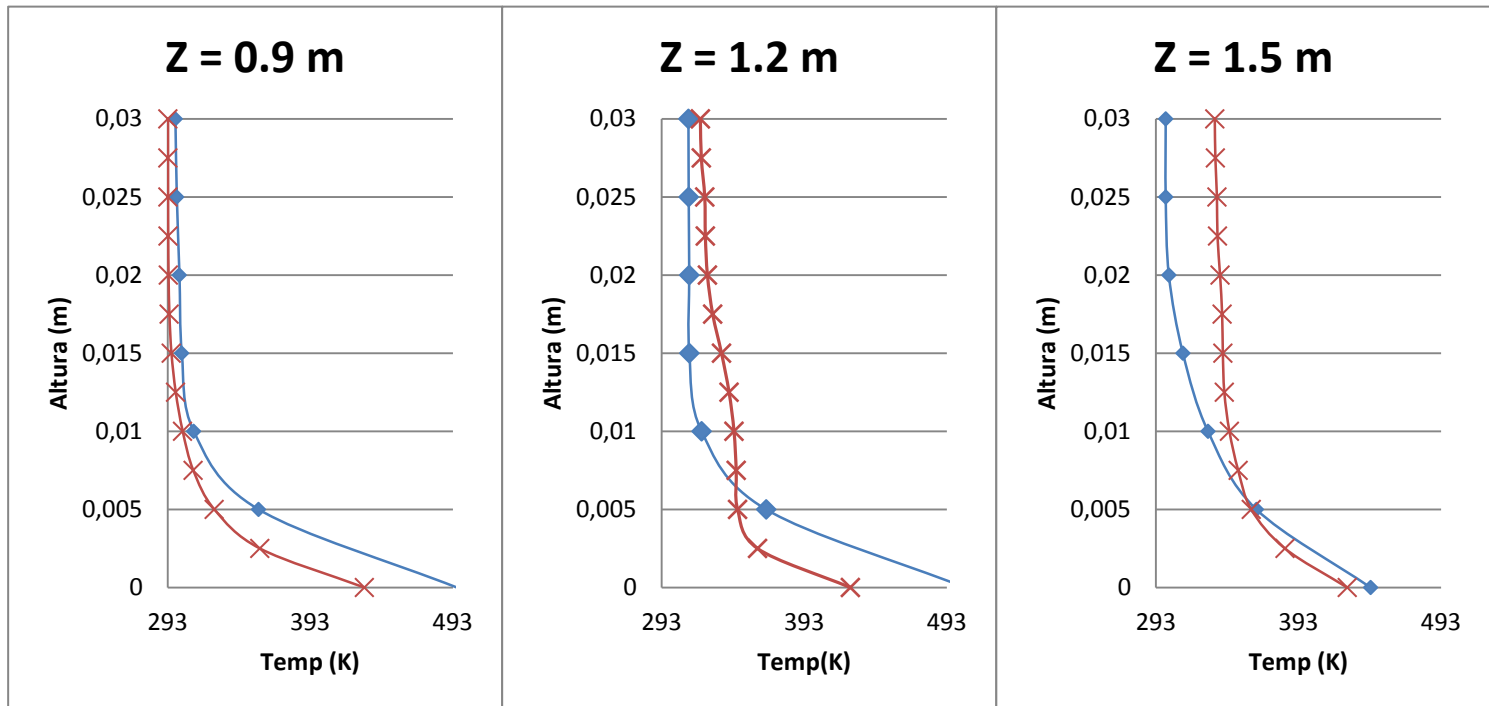


- 45.Figura 3.36 Vista lateral del captador para una inclinación de 45°.

El perfil de temperaturas evoluciona de manera similar al del captador inclinado 15° o 30°. Como se aprecia en la figura 3.37, es necesario refinar la malla para obtener resultados más precisos. Al tener el doble de nodos en las 3 direcciones espaciales nos aseguramos de llegar a una solución más próxima a la realidad. Por otro lado el tiempo computacional aumenta exponencialmente.

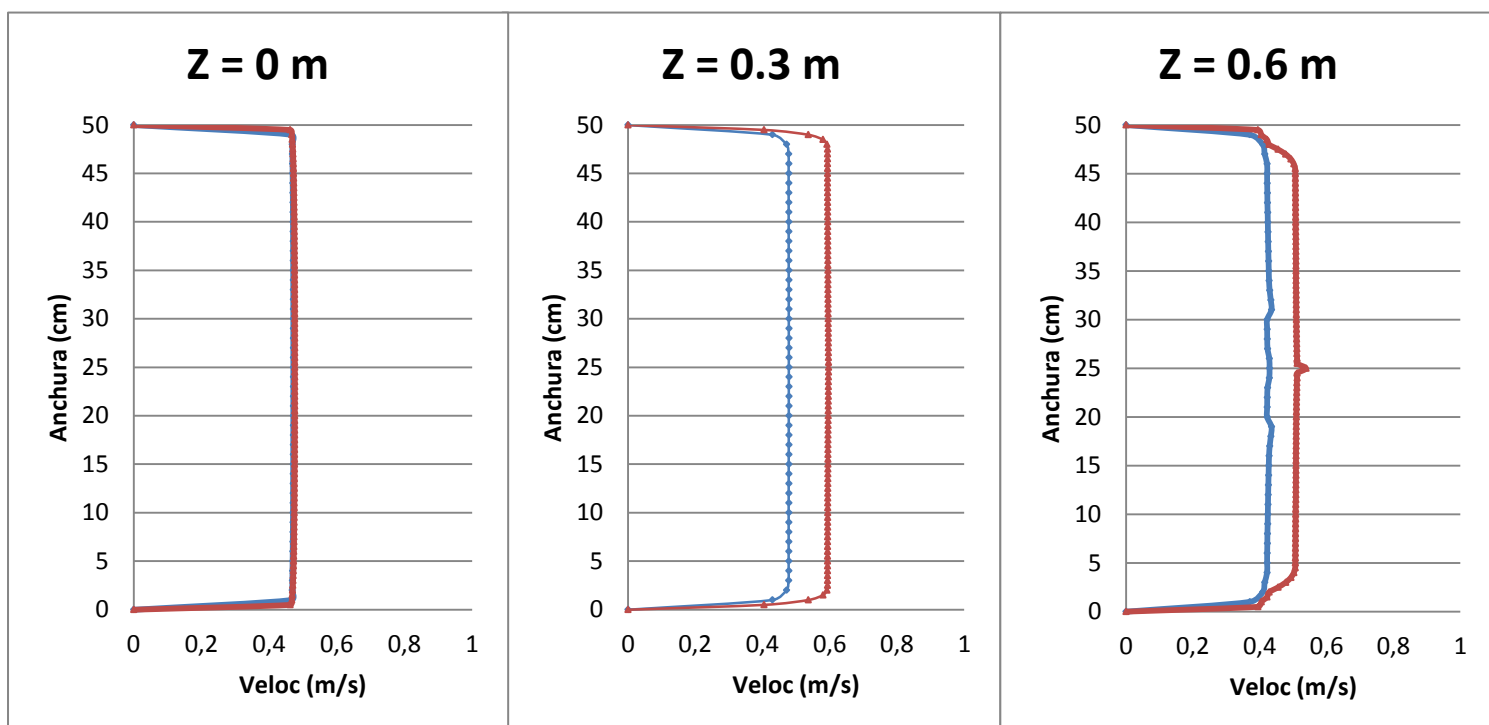


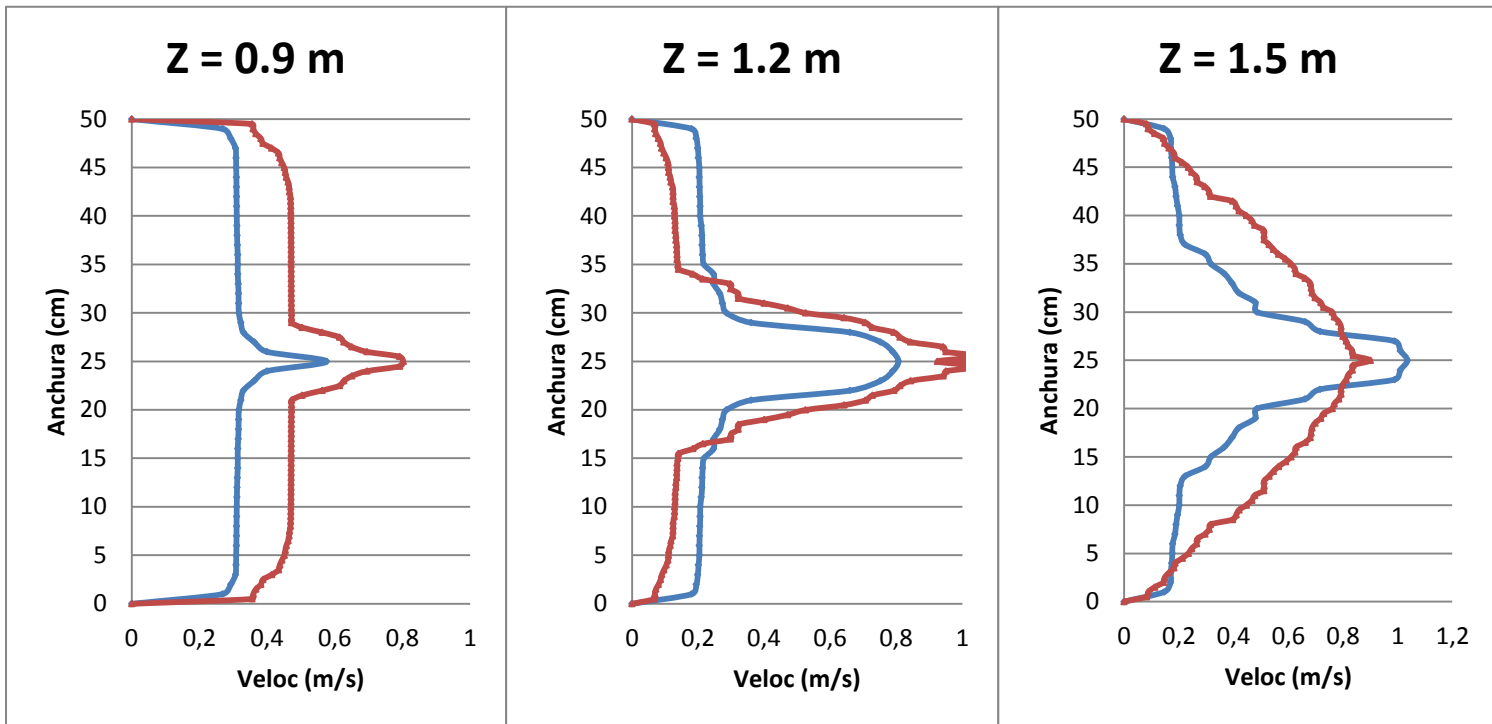
3. Modelo simulado



- 46.Figura 3.37 Distribución de temperaturas de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =45°.

El perfil de velocidades presenta claramente dos evoluciones diferentes. Hasta $Z=0.6\text{m}$, es bastante uniforme, con una velocidad cercana a 0.6 m/s . pero al llegar a $Z=0.9$ la corriente de aire se acelera claramente por el centro hasta llegar a valores próximos a 1 m/s con la malla refinada.





- 47.Figura 3.38 Distribución de velocidades de la corriente. Azul sin refinar. Rojo malla refinada. Ángulo =45°.

3.2.1 COMPARACIÓN INCLINACIÓN 15°, 30°, 45°.

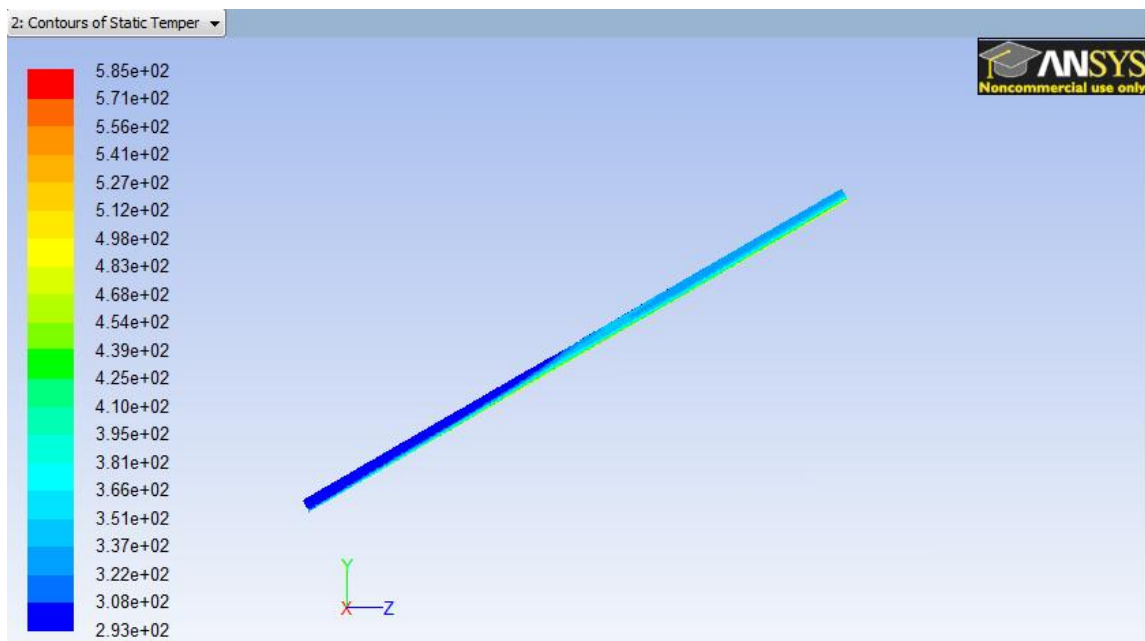
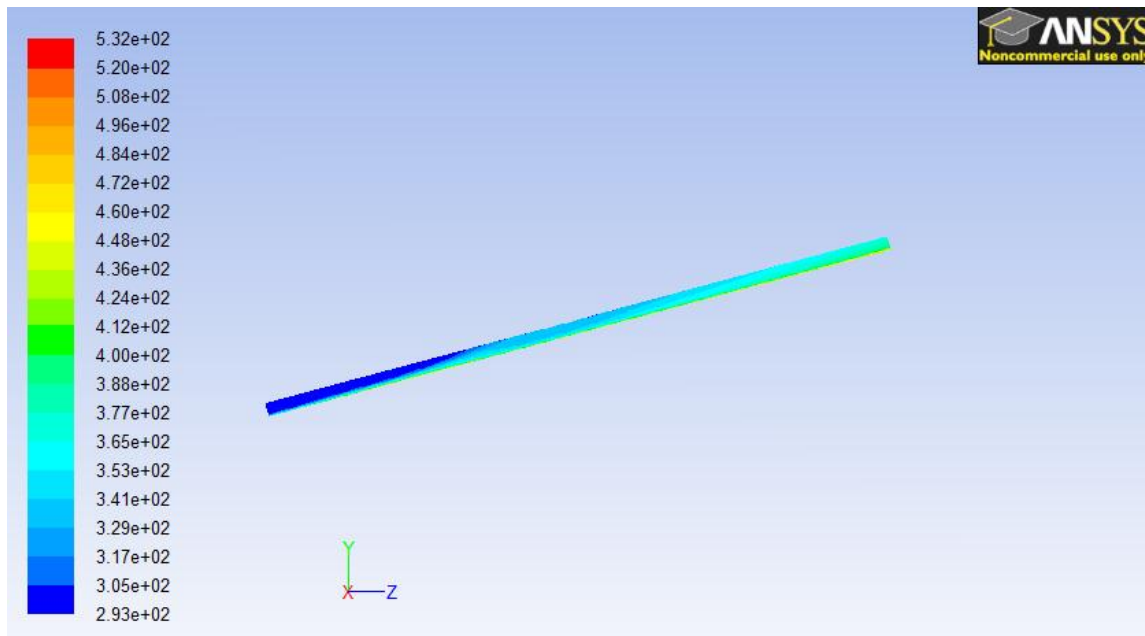
La inclinación óptima del captador solar dependerá de su aplicación y de su lugar de funcionamiento. Por ejemplo, si se quiere utilizar en España, no se colocará con la misma inclinación que si se quiere utilizar en Suecia, que está mucho más al norte. Por ello, la latitud es importante a la hora de colocar el captador solar como se estudiará más profundamente en el capítulo 4.

También es importante cómo y cuándo se quiere utilizar el captador. Por ejemplo, si está ubicado en España, no es lo mismo si se va a utilizar en verano o en invierno: si se quiere favorecer el funcionamiento en invierno, la inclinación óptima es la de la latitud + 10°. En cambio si se quiere que funcione a máximo rendimiento en verano, la inclinación será la de la latitud - 10°.

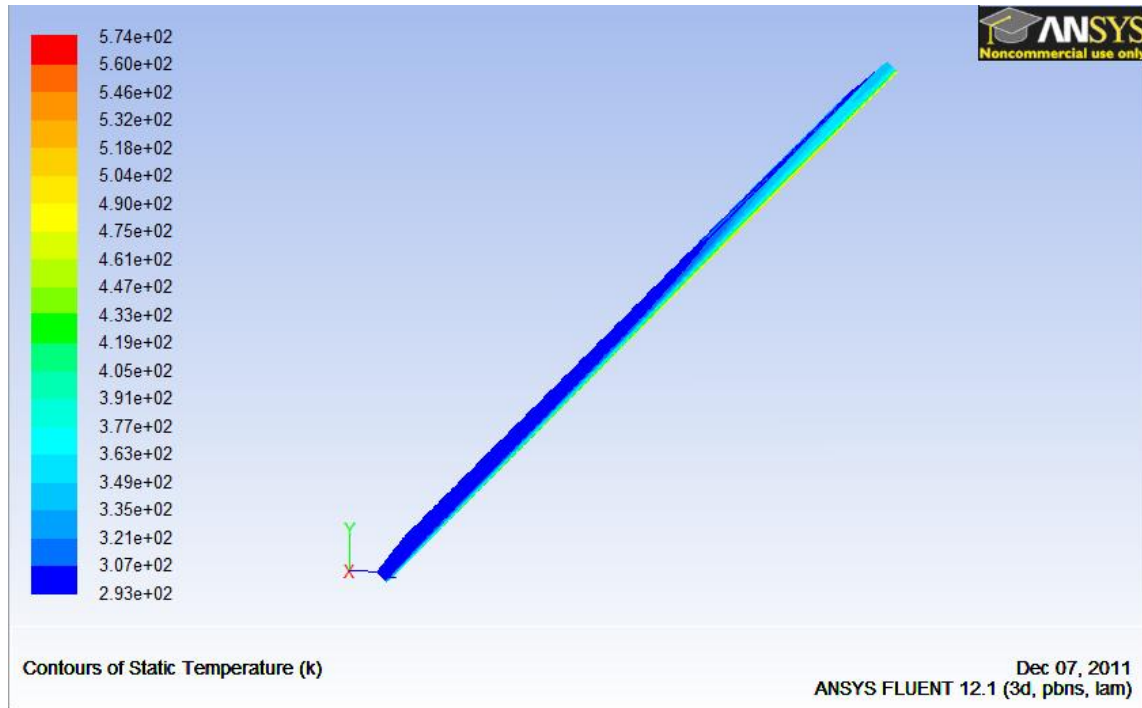
Además se ha comprobado como en convección natural, la inclinación resulta un parámetro muy importante, ya que la temperatura y la velocidad de salida de la corriente cambia de manera considerable. Esto no pasaba cuando se ha realizado el estudio en convección forzada, puesto que en ese caso las fuerzas de impulsión del ventilador son más importantes que las diferencias de temperatura que provocan fuerzas de flotabilidad que inducen un movimiento ascendente de la corriente.

3. Modelo simulado

En la figura 3.39, se puede observar cómo la inclinación del captador solar provoca diferencias de temperaturas a lo largo de él. Se puede observar como cuando la inclinación es de 15° y de 30° , la temperatura depende prácticamente linealmente con la posición Z, es decir a medida que nos adentramos en el captador solar, la temperatura de la corriente aumenta, ya que el área de la placa inferior caliente aumenta y el aire pasa más tiempo calentándose por ello.



3. Modelo simulado



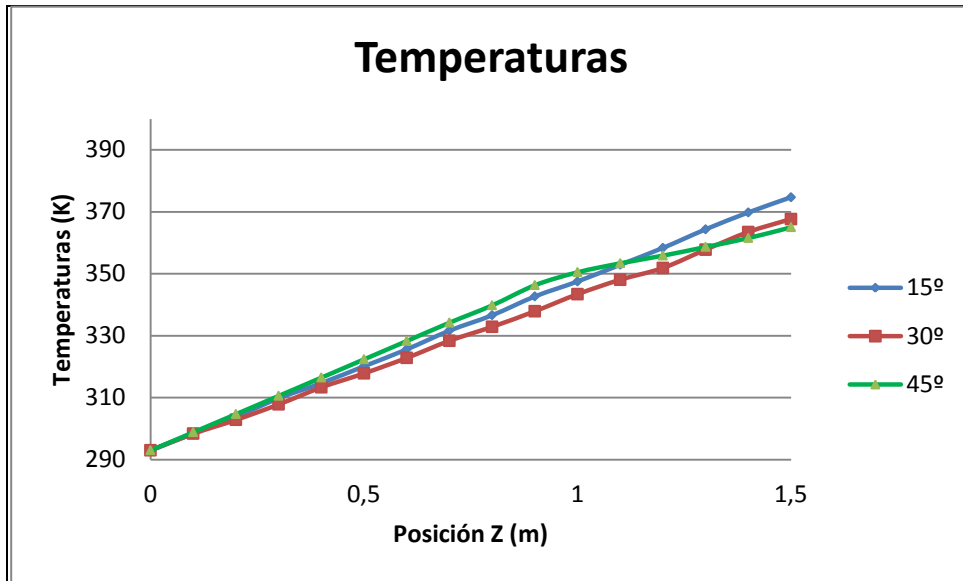
- 48.Figura 3.39 Comparación de la distribución de temperaturas para las 3 inclinaciones.

En las inclinaciones de 15° y de 30°, la temperatura parece que tiene un comportamiento muy parecido a cuando se simulaba convección forzada y se ponía una velocidad de entrada de la corriente conocida. El caso nominal era un valor de 1 m/s, pero la temperatura se comportaba de igual modo si la velocidad de entrada era menor o mayor.

Cuando la inclinación es bastante alta, 45°, parece que existen dos regiones diferenciadas. Hasta 0.8 m, la temperatura es más sensible que de 0.8 m hasta el final en 1.5 m. Esto quiere decir que el aire se calienta más rápido en la primera mitad del captador solar que en la segunda mitad, como se aprecia en la figura 3.40.

Es importante observar como a la salida, que es la región que más importa porque después del captador solar se colocaría la cámara de secado, la temperatura más alta se consigue para la inclinación de 15°, después para 30° y finalmente, la temperatura más baja a la salida es para una inclinación de 45°.

Estos valores para la temperatura a la salida serán importantes para calcular la potencia térmica que tendrá la corriente de aire. Cuanto mayor sea este parámetro, mayor capacidad de secado. A priori, observando la ecuación (2.2) se comprueba que cuanto mayor sea la temperatura de salida, mayor potencia térmica tendrá la corriente. Pero hay otros parámetros, como el gasto másico que resultarán también muy importantes y por ello se estudiarán a continuación.



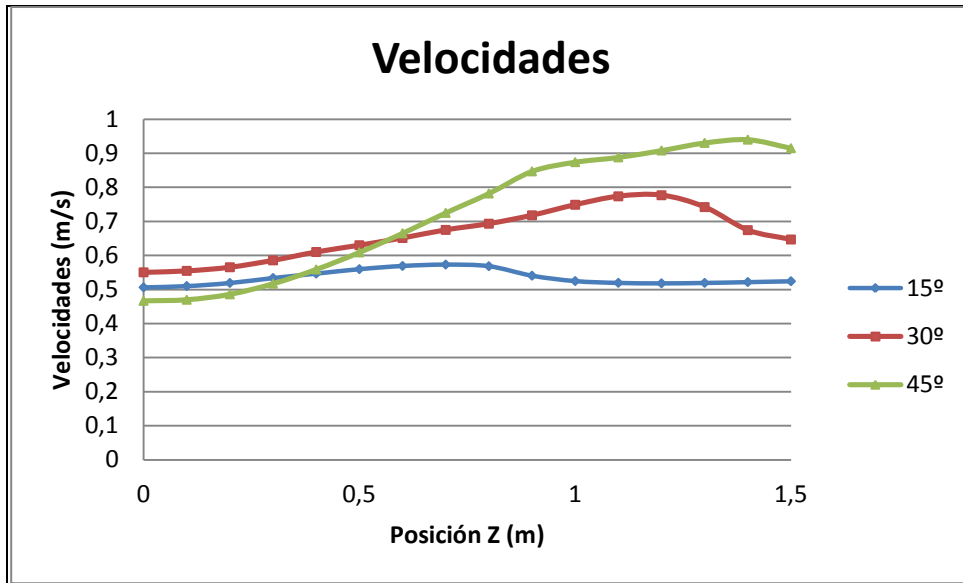
- 49.Figura 3.40 Comparación de temperaturas medias para las 3 inclinaciones.

En cuanto a las velocidades en el interior del captador solar, el comportamiento es parecido con las tres inclinaciones, empezando con una aceleración de la corriente, pero llegando a un punto en el captador solar en el que la corriente se decelera. Para 15°, el punto en el que ocurre esto es el punto medio, $Z = 0,75\text{m}$, para 30° es un poco más en lejano del inicio, se sitúa en $Z = 1,2\text{ m}$ y para la inclinación más elevada, la de 45°, ese punto está muy cercano a la salida, en $Z = 1,4\text{ m}$. estos resultados se pueden apreciar bien en la figura 3.41.

Este hecho también sucedía cuando se estudiaba convección forzada, y se observa en la figura 3.10 pudiéndose ver como la corriente se aceleraba hasta un punto cercano a 0.8 m a partir de ese punto la velocidad aumentaba.

Se puede observar en la figura 3.41 como el gasto la velocidad a la salida del captador es máxima para la inclinación de 45°, después para la inclinación de 30° y finalmente la velocidad más lenta a la salida se obtiene para la inclinación de 15°.

Este hecho resulta importante ya que el gasto másico depende directamente de la velocidad que se obtiene, y la potencia depende directamente del gasto de la corriente de aire. Por ello a mayores velocidades mayor potencia térmica.



- 50.Figura 3.41 Comparación de velocidades medias para las 3 inclinaciones.

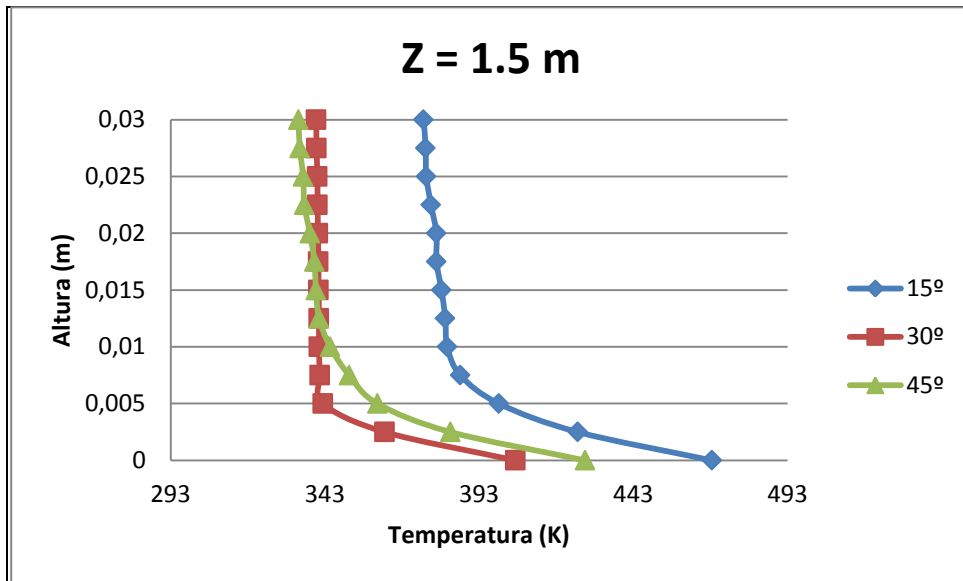
Existe entonces una lucha a la hora de calcular la potencia térmica que consigue la corriente para las tres inclinaciones, ya que para 15° se obtiene a la salida la mayor temperatura, pero la velocidad más baja, para 30° se obtienen los resultados intermedios y para 45° se consigue la mayor velocidad de salida, pero la menor temperatura al final del captador.

Por ello, es conveniente hacer un estudio de potencias térmicas para las tres configuraciones, y conseguir el rendimiento del captador solar. Pero también es conveniente observar lo que sucede a la salida. En la figura 3.42 se obtiene el perfil de temperaturas en $Z = 1.5$ m, es decir, a la salida para las tres inclinaciones elegidas.

Se observa que el perfil de temperatura más desarrollado es el de la inclinación de 15°, en la que se obtiene una media de 374.72 k. es una temperatura claramente más elevada que la que se obtiene para la inclinación de 30° que es de 367.66 k y la de 45° que es de 365.06 k y es por ello la temperatura más baja.

Se puede observar que para 30° y 45° la temperatura es muy parecida, sólo la temperatura en la inclinación de 15° es significativamente superior.

3. Modelo simulado



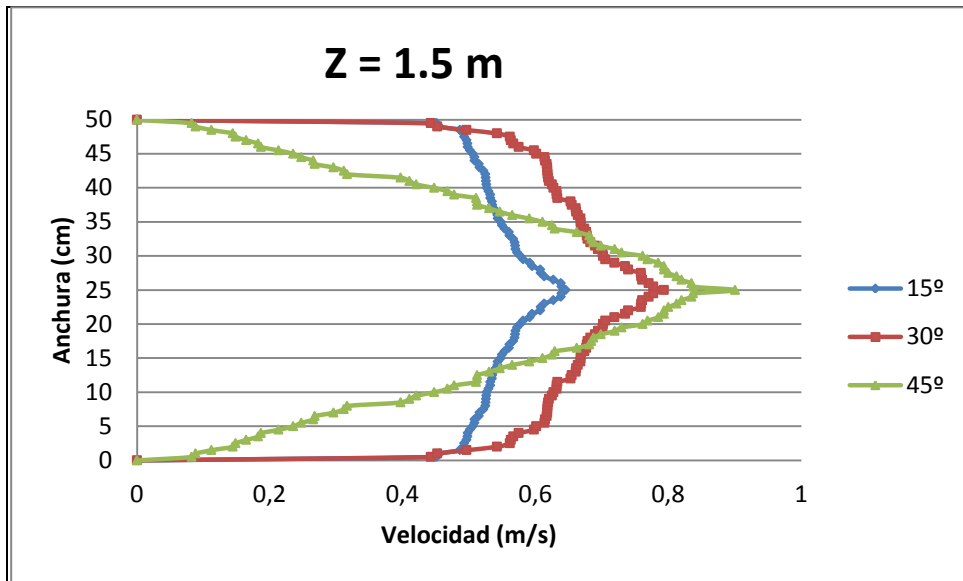
- 51.Figura 3.42 Perfil de temperaturas a la salida del captador solar.

El otro parámetro importante para calcular la potencia intercambiada es el del gasto másico, y lo que lo hace variar de un modo significativo es la velocidad a la salida del captador.

En la figura 3.42 , se observa los tres perfiles de temperatura que se dan para las 3 configuraciones diferentes. Para 15° y 30° el perfil de velocidades es bastante homogéneo, es decir, las velocidades de todos los puntos del captador son parecidas, siendo cero en las paredes y máxima en el centro.

Sin embargo para una inclinación de 45°, se tiene un perfil de temperaturas nada homogéneo, ya que cerca de las paredes la velocidad es mucho menor que en el centro. Por ejemplo, a 5 cm de la pared, para la inclinación de 15° se tiene una velocidad de 0.5 m/s y en el centro la velocidad es de 0.6 m/s. En cambio, para una inclinación de 45°, a 5 cm de las paredes se tiene una velocidad de 0.2 m/s y en el centro es cercana a 0.9 m/s.

3. Modelo simulado



- 52.Figura 3.43 Perfil de velocidades a la salida del captador solar.

La potencia térmica que tiene el aire a la salida del captador nos la da la ecuación (2.3) y el objetivo es que este valor sea lo más elevado posible. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Inclinación $\beta=15^\circ$, $I=1000\text{W/m}^2$:

	Velocidad de salida (m/s)	Temperatura de salida (K)	Calor útil (W) (Ecuación 2.3)	Rendimiento (Ecuación 2.4)
Malla sin refinar	0.5245	374.72	301.55	0.8036
Malla refinada	0.5072	381.29	314.84	0.8395

Tabla 5: 3.4 Obtención del calor útil y del rendimiento a la salida del captador para una inclinación de 15° .

Se puede comprobar observando la tabla cómo una vez que se refina la malla, con una precisión mayor, el rendimiento pasa de un 80% a un 84%, y esto es debido a que el calor útil que gana la corriente pasa de 301.55 W hasta 314.55 W.

El aumento del calor útil se produce porque una vez que se refina la malla se alcanzan temperaturas superiores, pese a que la velocidad disminuye (y con ello el gasto másico de la corriente).

3. Modelo simulado

- Inclinación $\beta=30^\circ$, $I=1000\text{W/m}^2$:

	Velocidad de salida (m/s)	Temperatura de salida (K)	Calor útil (W) (Ecuación 2.3)	Rendimiento (Ecuación 2.4)
Malla sin refinar	0.6469	367.66	345.93	0.9224
Malla refinada	0.6069	365.19	313.80	0.8368

Tabla 6: 3.5 Obtención del calor útil y del rendimiento a la salida del captador para una inclinación de 30° .

En la tabla se observa cómo la malla sin refinar tiene un rendimiento muy elevado, del 92% pero una vez que se refina se obtiene un rendimiento real de 83%, que es similar al del colector inclinado 15° , es decir se obtiene el mismo calor útil si el colector está a 15° o a 30° .

Con la malla refinada se obtiene un calor útil de 313 W, que se pueden aprovechar para el secado de alimentos, maderas, etc, que se colocarán en la cámara de secado, justo a continuación del captador solar simulado.

- Inclinación $\beta=45^\circ$, $I=1000\text{W/m}^2$:

	Velocidad de salida (m/s)	Temperatura de salida (K)	Calor útil (W) (Ecuación 2.3)	Rendimiento (Ecuación 2.4)
Malla sin refinar	0.915	365.06	438.64	1.16
Malla refinada	0.663	369.75	338.57	0.9028

Tabla 7:3.6. Obtención del calor útil y del rendimiento a la salida del captador para una inclinación de 45° .

En la tabla se comprueba cómo para la malla sin refinar existe un error claro debido a que se obtiene un rendimiento mayor a la unidad. Esto no puede ser posible ya que significaría que se ha creado una máquina capaz de dar más calor del que recibe sin la utilización de resistencias térmicas o resistencias eléctricas para conseguirlo. El error principal parece estar en la velocidad tan alta que se consigue a la salida, 0.91 m/s que es mucho mayor que en para la inclinación de 30° (0.6 m/s) o la de 15° (0.5 m/s).

El rendimiento para la malla refinada es del 90%. Puesto que los resultados han sido obtenidos mediante Fluent, y se han elegido condiciones de contorno adiabáticas en

3. Modelo simulado

las paredes del captador solar, el resultado que se supone correcto es el del rendimiento del 100%, ya que no hay pérdidas de calor.

En la tabla se van a comparar los calores útiles y los rendimientos obtenidos para las tres configuraciones estudiadas con la malla refinada, y se sacarán conclusiones:

Inclinación	Calor útil (W)	Rendimiento (%)
15°	314.84	83.95
30°	313.80	83.68
45°	338.57	90.28

Tabla 8: 3.7 Calor útil y rendimiento para la malla refinada de las 3 configuraciones.

A la vista de los resultados, se concluye que para una irradiación constante de 1000 W/m^2 en la superficie de una placa de acero negro, capaz de irradiar de la misma manera hacia el aire (que actúa de fluido calo portador), la instalación más rentable tanto por la obtención de calor como por la de eficiencia, es la de colocar el captador solar a una inclinación de 45°.

La combinación de temperatura a la salida y velocidad a la salida promedio de 45° hacen que el calor a la salida sea mayor que para 15° o 30°. Luego se concluye que para convección natural, cuanto más inclinación haya, mayor transferencia de calor existirá.

Pero llegados a este punto, nos puede surgir una duda. El modelo estudiado en Fluent asigna una radiación constante de 1000 W/m^2 de la placa al fluido. Se ha estudiado este caso porque primero se ha hecho un estudio del comportamiento del fluido ante condiciones de geometría cambiantes, donde se concluye que una inclinación de 45° es más eficiente que una de 30° y otra de 15° a la hora de la transferencia del calor. Pero una vez sabido este dato, cuando el captador solar se coloque en la superficie terrestre, estará expuesto a las condiciones climáticas de la zona. El primer parámetro que entra en juego es la inclinación del colector, que ya se ha estudiado. Pero también entran en juego la declinación δ , la latitud donde se coloque el captador solar (por ejemplo la que se estudiará será la de Leganés que es $\phi=40.19^\circ$) y más parámetros que se estudiarán en el punto 4.

4. EL PAPEL DE LA RADIACIÓN SOLAR

En el apartado 3.2.1 se ha comprobado como para una inclinación de $\beta = 45^\circ$ se obtiene una potencia térmica mayor en la corriente de aire que pasa por el colector solar. Si se observa la tabla 3.7 se comprueba que la potencia obtenida es de 338.57 W con un rendimiento del 90.28 %, que se acerca al 100 % que se debería haber obtenido en una simulación, utilizando Fluent como software.

Pero en ese apartado no se ha tenido en cuenta el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, que provoca una inclinación en los rayos solares que hacen que nos tengamos que replantear qué modelo es mejor, si colocando el captador solar a 15° sobre la horizontal, o 30° o 45° .

Se realiza este estudio debido a que en función de la inclinación β elegida, la irradiación sobre el colector puede cambiar de manera importante. Para poder comprender mejor este hecho, se procederá a estudiar parámetros como la distancia al sol, declinación, ángulo horario altura solar y ángulo cenital, ángulo azimutal, ángulo de salida y puesta de sol y duración del día entre otras.

El objetivo será obtener la irradiación máxima que le llega al captador solar para cada inclinación mediante un programa en Mathcad y hacer un estudio del comportamiento del fluido en esas condiciones con Fluent y hacer una comparación más fiable para poder tomar una decisión sobre qué inclinación será la óptima.

4.1 EL SOL

El sol es la estrella central del sistema solar que acumula el 99 % de la masa del mismo. Se trata de la estrella más cercana a la Tierra y gracias a la cual existen condiciones para la vida en nuestro planeta. Nos proporciona luz y calor.

Se trata de una estrella G2: G significa que en la superficie se alcanzan temperaturas de entre 5000 y 6000 K y que tiene un color amarillo por tanto y el 2 significa dentro de ese rango a qué temperatura se acerca más (dentro de una escala de 0 a 9, donde 0 es lo más caliente y 9 lo más frío). Por ello podemos decir que la temperatura del sol ronda los 5800 K.

Se puede complementar esta información diciendo que el sol es una estrella G2V donde V significa enana. Por tanto el sol es una enana amarilla con una temperatura superficial en torno a 5800 K. A continuación se adjuntan las tablas que permiten clasificar las estrellas presentes en el Universo, a título informativo.

4. El papel de la radiación solar

Clase	Temperatura (K)	Color
O	30000-60000	Azul
B	10000-30000	Azul-Blanco
A	7500-10000	Blanco
F	6000-7500	Amarillo-Blanco
G	5000-6000	Amarillo
K	3500-5000	Amarillo-Naranja
M	2000-3500	Rojo

Tabla 9: 4.1 Clasificación estelar en base a su temperatura.

Clase	Descripción
Ia	Supergigante muy luminosa
Ib	Supergigante de menor brillo
II	Gigante luminosa
III	Gigante
IV	Sub-gigante
V	Enana
VI	Sub-enana
VII	Enana blanca

Tabla 10: 4.2 Clasificación estelar en base a su luminosidad.

4.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SOL

Aunque por todos es sabido que el sol es un astro mucho mayor que la Tierra, es difícil hacerse una idea de cuánto más lo es. En la siguiente tabla se enumeran algunos parámetros de interés y se pueden comparar los valores que se tienen.

	Sol	Tierra
Radio (km)	696000	6378
Volumen (m ³)	$1,41 \cdot 10^{27}$	$1,087 \cdot 10^{21}$
Masa (kg)	$1,989 \cdot 10^{30}$	$5,98 \cdot 10^{24}$
Densidad media (g/cm ³)	1,41	5,52
Aceleración de la gravedad (m/s ²)	274	9,81
Velocidad de escape (km/s)	617,4	11,2

Tabla 11: 4.3 Características físicas del Sol y la Tierra.

4. El papel de la radiación solar

Se puede comprobar cómo el Sol tiene un millón de veces el volumen de la Tierra o casi un millón de veces su masa. No es proporcional porque la densidad del Sol es más baja que la de la Tierra, debido a que se compone en mayor medida de elementos ligeros.

4.1.2 MOVIMIENTOS DEL SOL

El sol posee dos movimientos, no permanece en una posición fija en el espacio. El primero es el de translación y el segundo es el de rotación. Sucede lo mismo con la Tierra.

Translación:

Tanto el Sol, como el resto del Sistema Solar están en continuo movimiento alrededor de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Y este movimiento se produce a una velocidad de 216 km/s y la duración del recorrido de su órbita es de 230 millones de años.

Rotación:

El Sol posee un movimiento de rotación diferencial es decir, no todos los puntos tiene la misma velocidad de rotación. Esto es debido a que el Sol no es un cuerpo sólido como la Tierra. Mientras que las partículas situadas en la zona ecuatorial tienen un periodo de rotación de 25,4 días, en los polos es de 36 días.

4.1.3 POSICIÓN SOLAR

La posición relativa entre Sol-Tierra resulta de vital importancia cuando se quiere aprovechar la radiación solar en términos energéticos. Por ello, se estudiarán parámetros como los siguientes para determinar dicha posición de una forma lo más precisa posible.

4.1.3.1. DISTANCIA SOL-TIERRA

El valor medio de la distancia Sol-Tierra es de $1,496 \cdot 10^{11}$ m y este valor recibe el nombre de unidad astronómica (UA). Sin embargo este valor no es constante, debido al hecho de que la Tierra describe un movimiento elíptico alrededor del Sol, en lugar de circular. El Sol se encuentra en uno de los focos de la elipse, y la Tierra describe un movimiento elíptico alrededor del Sol y por ello la distancia entre el Sol y la Tierra varía diariamente.

La distancia entre el Sol y Tierra diaria puede ser calculada por medio de la siguiente expresión:

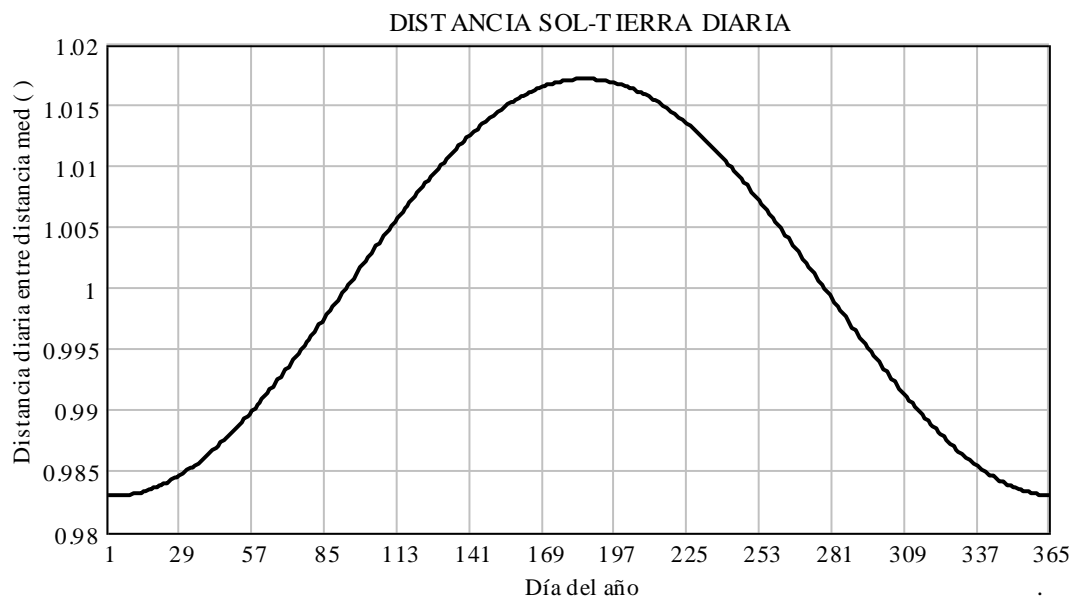
4. El papel de la radiación solar

$$r^2 = \frac{r_0^2}{1,000110 + 0,034221 \cdot \cos(\Gamma) + 0,00128 \cdot \sin(\Gamma) + 0,000719 \cdot \cos(2\Gamma) + 0,000077 \cdot \sin(2\Gamma)}$$

Donde r_0 es la unidad astronómica y Γ , en radianes, se calcula conocido el número de día del año (n) como:

$$\Gamma = \frac{2\pi \cdot (n-1)}{365}$$

El resultado obtenido se muestra en el siguiente gráfico.



- 53.Figura 4.1 Distancia Sol-Tierra diaria.

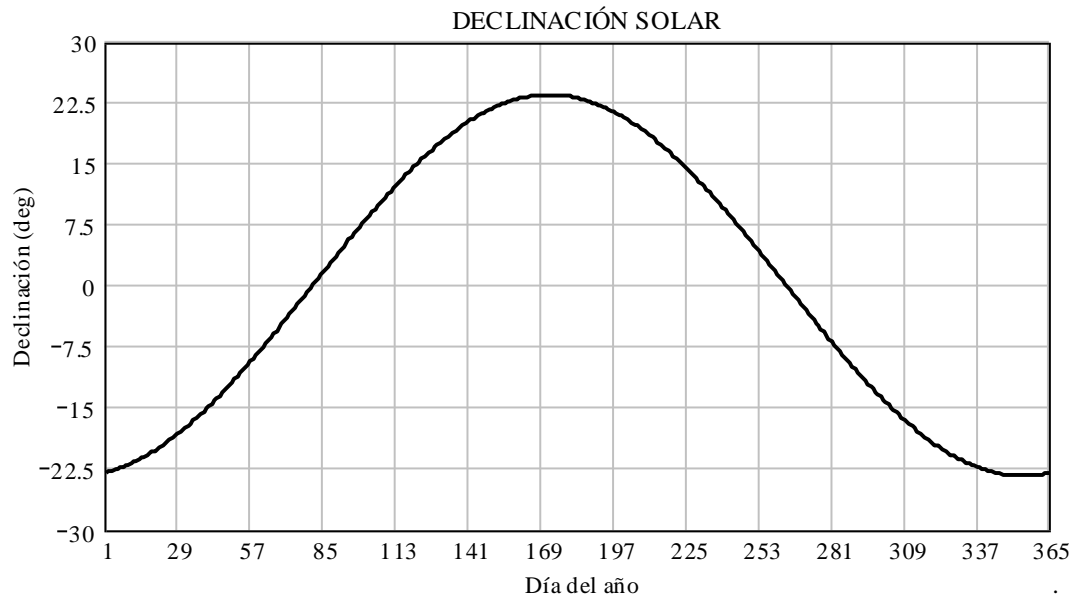
En la figura se observa como en los primeras días del año y en los últimos, es decir en diciembre y en enero que es cuando más frío hace, es cuando la Tierra se encuentra a menor distancia del Sol. Y en verano (días centrales de la figura) es cuando más lejos nos encontramos. Para explicar este suceso, se explicará el siguiente parámetro, que es la declinación.

4.1.3.2. DECLINACIÓN

La Tierra posee un movimiento de translación alrededor del Sol y otro de rotación. Este último lo hace con un ángulo respecto a la normal del plano de la eclíptica de $23,45^\circ$, que permanece constante, por lo que el ángulo de la línea que une los centros del Sol y la Tierra y el plano ecuatorial varía continuamente. Este ángulo es la declinación solar δ , y se puede calcular para cada día del año mediante la siguiente ecuación:

4. El papel de la radiación solar

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right)$$

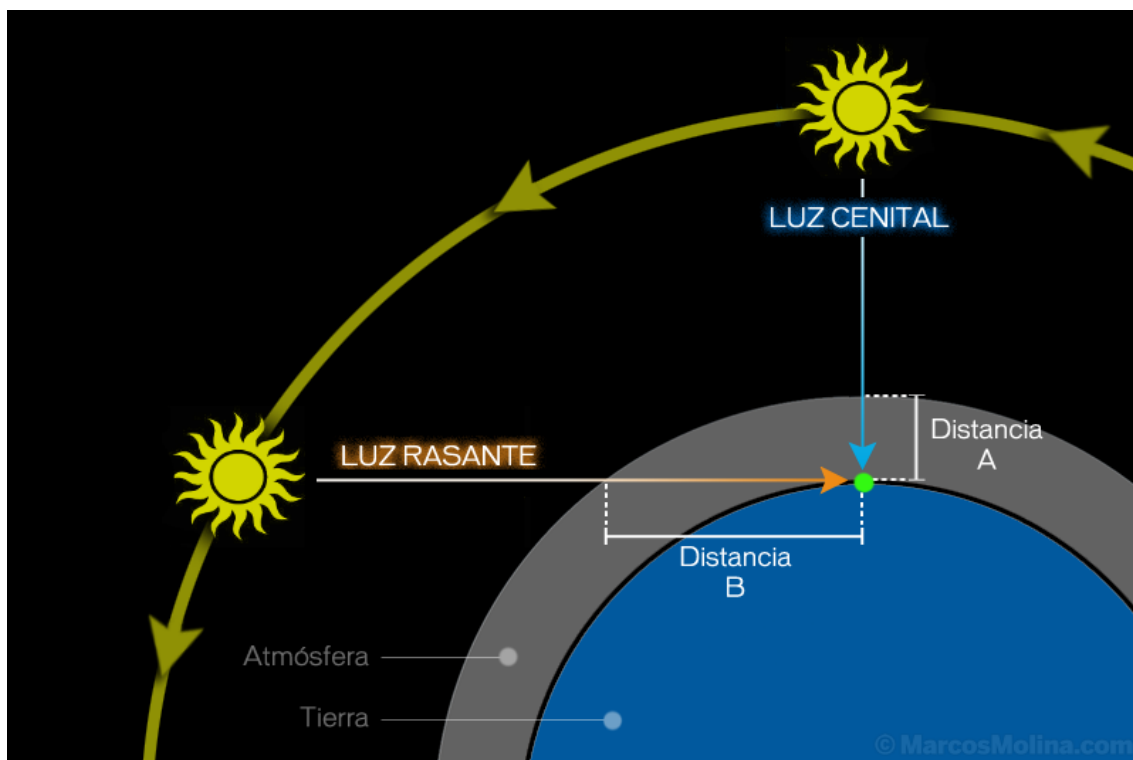


- 54.Figura 4.2 Declinación solar diaria.

En la figura se puede comprobar cómo la declinación es positiva en los días centrales del año en el Hemisferio Norte. Esto quiere decir que los rayos solares inciden más perpendicularmente en estos días en el Hemisferio Norte y será verano allí, mientras que en el Hemisferio Sur será invierno.

Por otro lado, en los primeros y últimos días del año, la inclinación de los rayos solares es más perpendicular en el Hemisferio Sur, por lo que será verano allí e invierno en el Hemisferio Norte.

Para entender la importancia de que los rayos solares incidan perpendicularmente sobre la superficie terrestre se debe introducir el concepto de masa de aire. La masa de aire se define como la longitud recorrida por la radiación solar a lo largo de la atmósfera terrestre, tomando como unidad el recorrido en dirección radial hasta el nivel del mar. La figura 4.3 muestra gráficamente el concepto de masa de aire.



- 55.Figura 4.3 Concepto de masa de aire.

Cuanto menor sea la masa de aire, es decir cuanto más perpendicularmente incidan sobre la atmósfera los rayos solares, mayor será la radiación solar que incide sobre el suelo ya que la atmósfera actúa sobre la radiación como un filtro, produciéndose en ella fenómenos de absorción, difusión, dispersión y reflexión.

Observando la figura, se puede comprobar cómo la distancia A es menor que la distancia B, luego la radiación que incide sobre la Tierra en A es mayor que en B, porque la luz atraviesa menos distancia de atmósfera. Este hecho es fácil de comprobar experimentalmente, ya que de todos es sabido que en las horas centrales del día, hace más calor que al amanecer o al atardecer, y el Sol sigue siendo el mismo en todos los momentos del día. Pero a las 12 horas solares, el Sol irradia de manera perpendicular y a primeras y últimas horas del día lo hace con un ángulo que hace que la radiación que llega a la Tierra sea absorbida en mayor medida por la atmósfera.

4.1.3.3. ÁNGULO HORARIO, ω

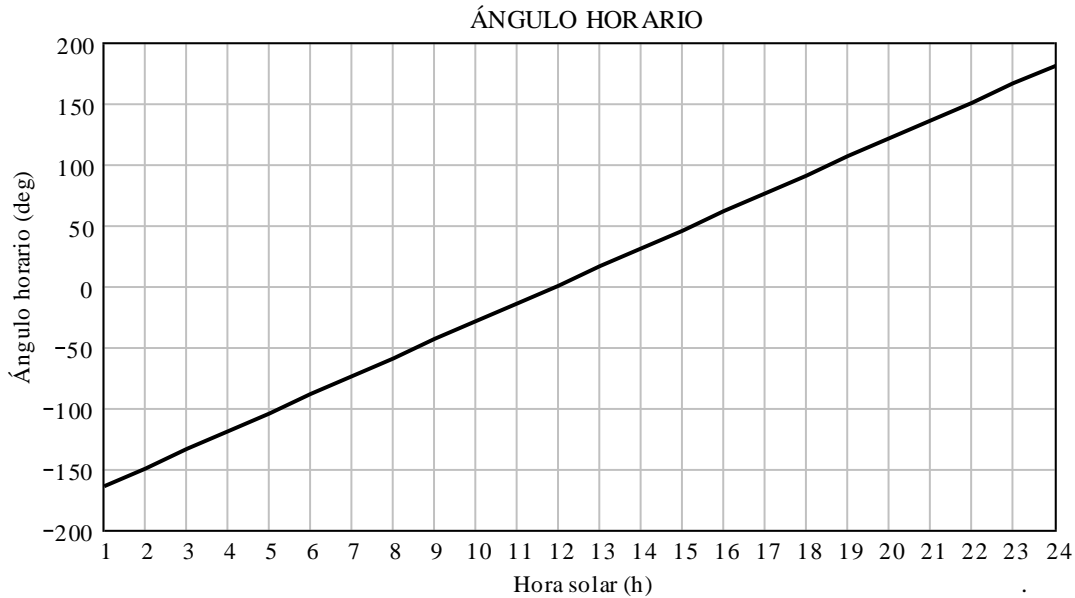
Se define para un punto determinado de la Tierra como el ángulo entre dos planos que pasan por el eje de rotación de la Tierra, uno de los cuales pasa por la localización deseada y el otro por el Sol.

Cuando está en el cenit, que es el punto más alto que alcanza el Sol, a las 12 horas solares, el ángulo horario será 0° , y contará con ángulos negativos antes de ese

4. El papel de la radiación solar

punto y positivos después, a razón de 15° por hora dada la velocidad de la Tierra, ya que 15° por 24 horas nos dan los 360° que tiene la esfera terrestre.

Por lo tanto, el ángulo horario dependerá de la hora solar exclusivamente, tal como se muestra en la figura 4.4.



- 56.Figura 4.4 Ángulo horario.

4.1.3.4 ALTURA SOLAR, α

La altura solar se define como el ángulo que existe entre la horizontal y la línea que une al observado con el Sol. Se calcula del siguiente modo:

$$\alpha = a \operatorname{sen}(\phi) \cdot \operatorname{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$

Donde ϕ es la latitud del lugar considerado, que para el caso de Leganés es de 40,19°, δ la declinación y ω el ángulo horario.

Se comprueba como la altura solar depende de la situación del observador mediante la latitud, del momento en el año en que nos encontramos con la declinación y de la hora del día con el ángulo horario.

El ángulo complementario a la altura solar, es decir el formado por la línea que une al observador con el Sol y la normal a la superficie, se conoce como ángulo cenital (θ_z). El ángulo cenital puede ser calculado conocidos el ángulo horario, la latitud y la declinación del mismo modo que hicimos con la altura solar.

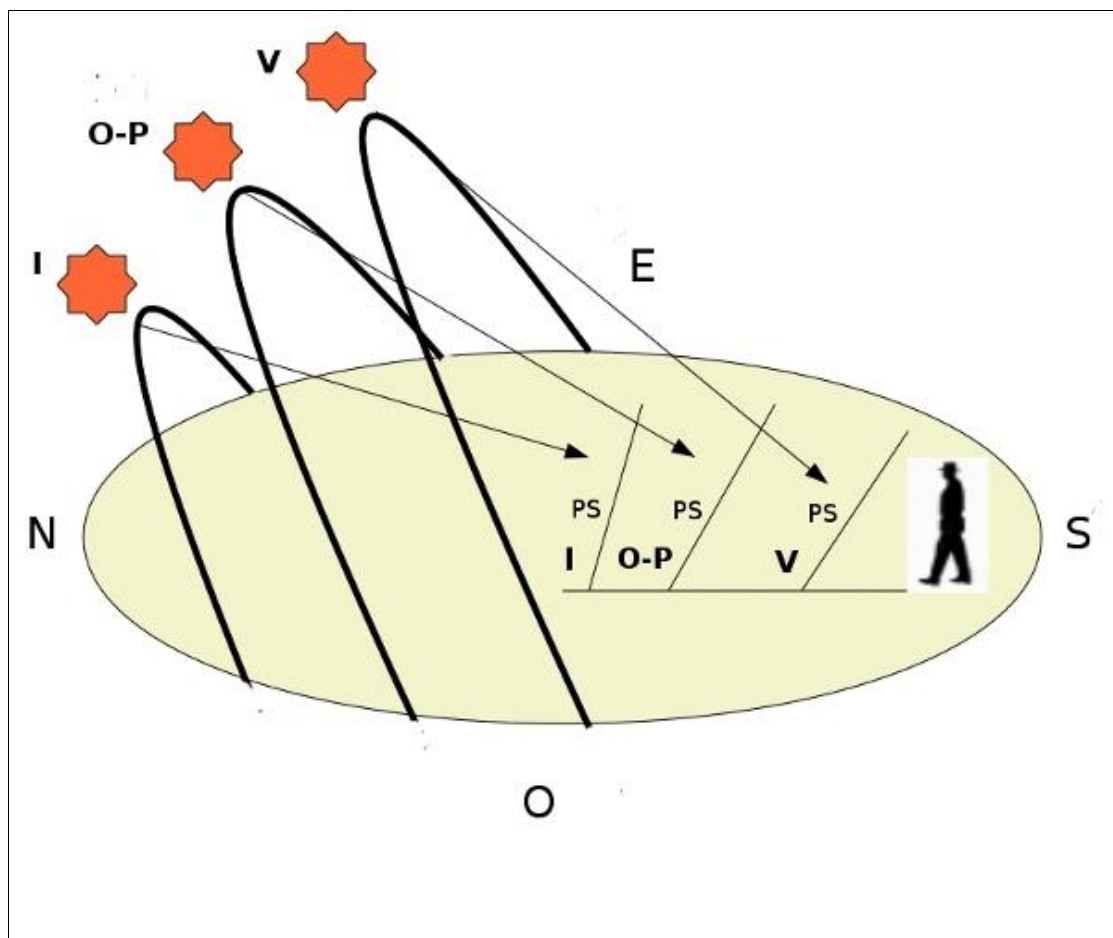
$$\theta_z = a \cos(\operatorname{sen}(\phi) \cdot \operatorname{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega))$$

4. El papel de la radiación solar

En caso de conocer la altura solar, conoceríamos inmediatamente el ángulo cenital y viceversa pues, como comentábamos anteriormente, ambos ángulos son complementarios.

$$\theta_z = 90 - \alpha$$

La altura solar será superior durante el periodo de verano de modo que, como comentábamos anteriormente, la masa de aire será menor alcanzando la radiación valores mayores. En la siguiente figura se puede apreciar gráficamente la diferencia entre la altura solar en invierno y en verano.



- 57.Figura 4.5 Altura solar en primavera, verano, otoño e invierno.

En la figura 4.5 se observa claramente la variación de la altura solar a lo largo del año, los valores máximo y mínimo de la altura solar dependerán de la latitud del lugar estudiado.

4.1.3.5 ÁNGULO AZIMUTAL, γ_s

El ángulo azimutal es el que forman la proyección de la línea que une el sol con el observador sobre la superficie terrestre y la dirección Sur. El ángulo azimutal toma un valor de 0° cuando el sol se sitúa en la dirección Sur, valores negativos para la orientación Este y valores positivos para la orientación Oeste. Para calcular el ángulo azimutal se debe conocer la declinación, el ángulo horario y bien la altura solar o el ángulo cenital.

$$\gamma_s = a \operatorname{ases} \left(\frac{\cos(\delta) \cdot \operatorname{sen}(\omega)}{\cos(\alpha)} \right) = a \operatorname{sen} \left(\frac{\cos(\delta) \cdot \operatorname{sen}(\omega)}{\operatorname{sen}(\theta_z)} \right)$$

4.1.3.6 ÁNGULO DE SALIDA Y PUESTA DEL SOL, ω_{sh}

Es el ángulo que forma la línea que une al Sol en su salida y su puesta con el observador, y la dirección Sur. Dada la simetría existente, el ángulo de salida coincidirá con el de puesta del Sol. Se puede calcular sabiendo la declinación y la latitud con la siguiente ecuación:

$$\omega_{sh} = a \cos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta))$$

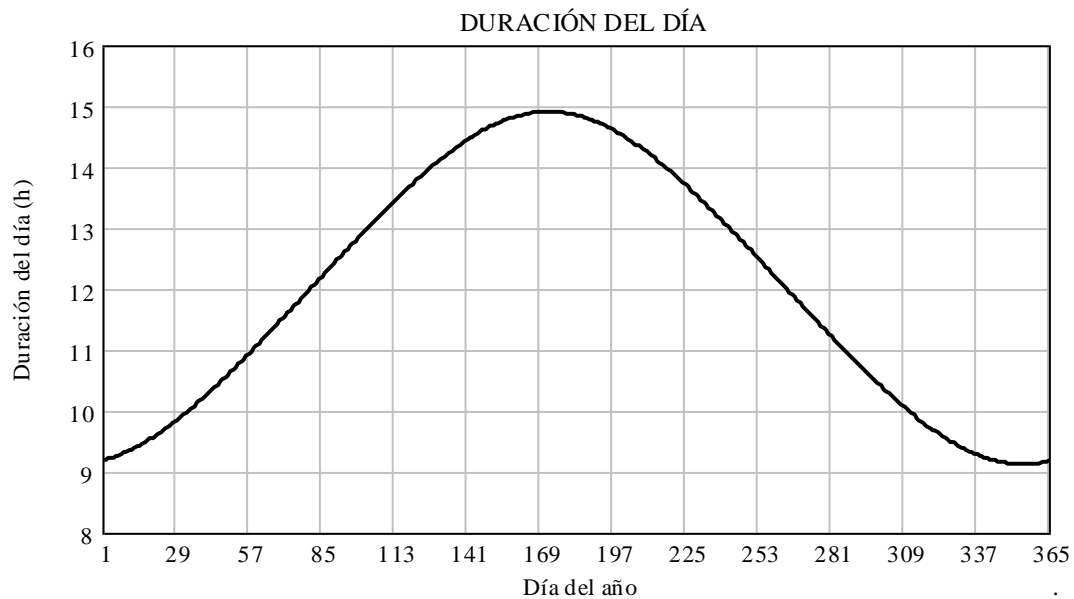
4.1.3.7 DURACIÓN DEL DÍA

Conocido el ángulo de salida y puesta del Sol se puede conocer la duración del día (DD). Si se quiere conocer la duración del día en horas se debe dividir el valor anterior entre 15, ya que dada la velocidad de giro de la Tierra una hora se corresponde con 15° .

$$DD = \frac{2 \cdot \omega_{sh}}{15}$$

Se observa gráficamente la duración horaria del día a lo largo del año en la figura 4.6

4. El papel de la radiación solar

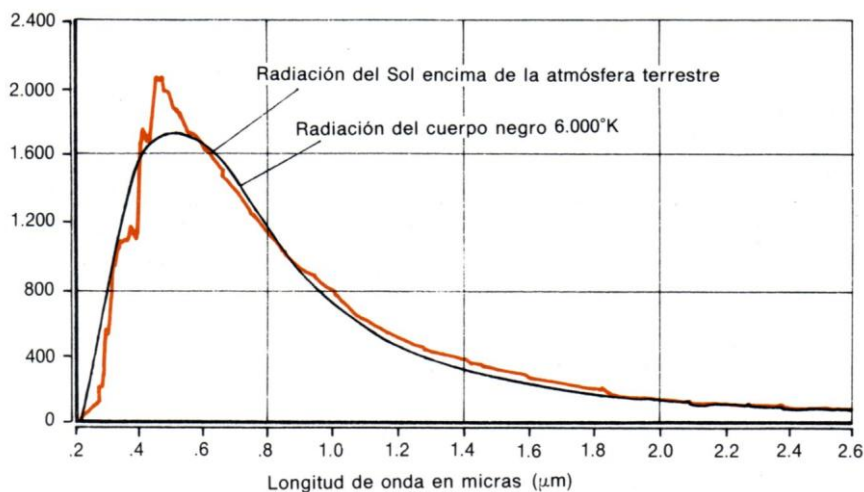


- 58.Figura 4.6: Duración horaria del día para la latitud correspondiente a Leganés.

Como es lógico se observa como en verano la duración del día es mayor que en invierno, ya que el camino recorrido por el sol en el cielo es mayor que en invierno. Es una forma de hablar, porque realmente la Tierra es la que orbita alrededor del Sol en órbitas elípticas como ya se ha comentado.

4.2 LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación emitida por el Sol se distribuye en un amplio rango de longitudes de onda, parecido al que emitiría un cuerpo negro a una temperatura de 6000 K como se ve en la figura.



- 59.Figura 4.7: Distribución espectral de la radiación solar y de un cuerpo negro a 6000K.

4. El papel de la radiación solar

La franja visible se encuentra entre las longitudes de onda de 0.35 y 0.75 μm , que coincide con la longitud de onda de la radiación emitida por el Sol. Para bajas longitudes de onda tenemos el espectro ultravioleta, que es más energético que la banda infrarroja (longitudes de onda superiores a 0.75 μm).

4.2.1 APROVECHAMIENTO DE LA RADIACIÓN SOLAR

La energía solar se puede aprovechar de dos maneras principalmente a la hora de obtener energía de manera limpia y eficiente. Se puede aprovechar la radiación solar en células fotovoltaicas y también en captadores solares para la obtención de energía solar térmica de baja temperatura. En este proyecto, nos centraremos en la segunda opción.

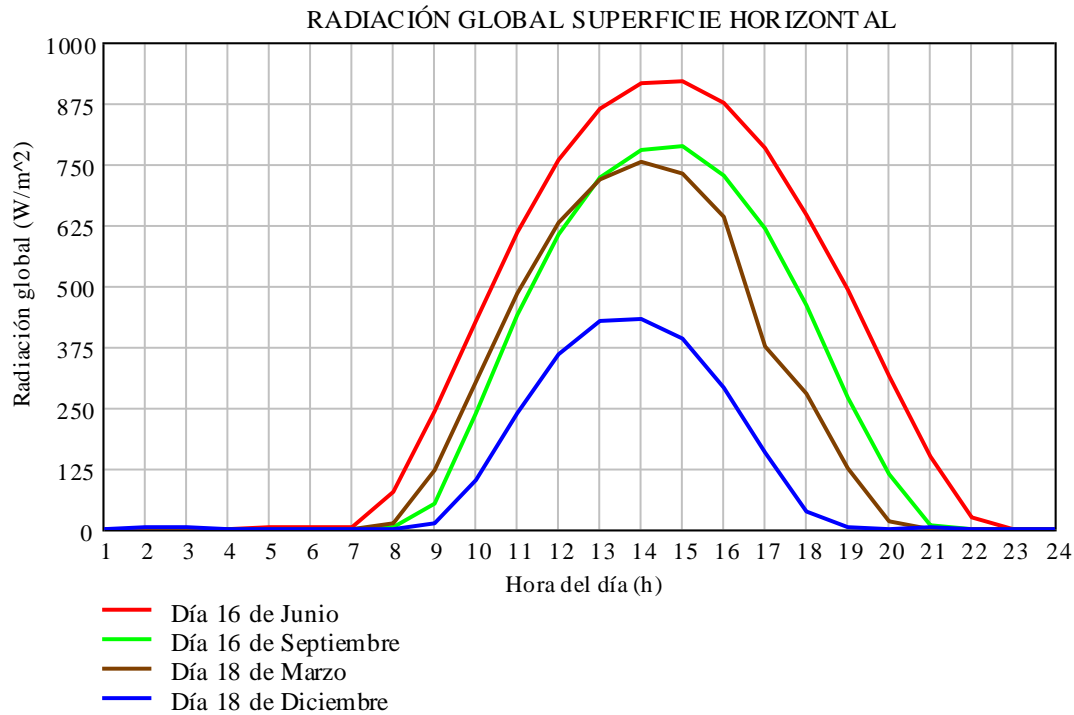
4.2.1.1 RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL

Para la realización del presente proyecto se cuenta con los datos de radiación solar sobre una superficie horizontal, presión atmosférica, temperatura atmosférica, humedad relativa, velocidad del viento y dirección del mismo gracias a la estación meteorológica del Área de ingeniería Térmica de la Universidad Carlos III de Madrid, situada en el campus de Leganés. Se analizarán los datos en el capítulo siguiente, no obstante para calcular la radiación sobre el plano inclinado se necesitan los datos de radiación sobre la superficie horizontal.

En la siguiente figura se observa la variación de la radiación a lo largo de un día en las 4 estaciones del año para un día soleado.

En la figura 4.8 se puede comprobar cómo la curva de la radiación tiene la misma forma para cualquier día del año, empezando de cero a primeras horas del día, ya que no hay sol, y aumentando desde que amanece para tener un máximo a las 12 horas solares, disminuyendo hasta que atardece y se va el sol, valiendo cero otra vez.

4. El papel de la radiación solar



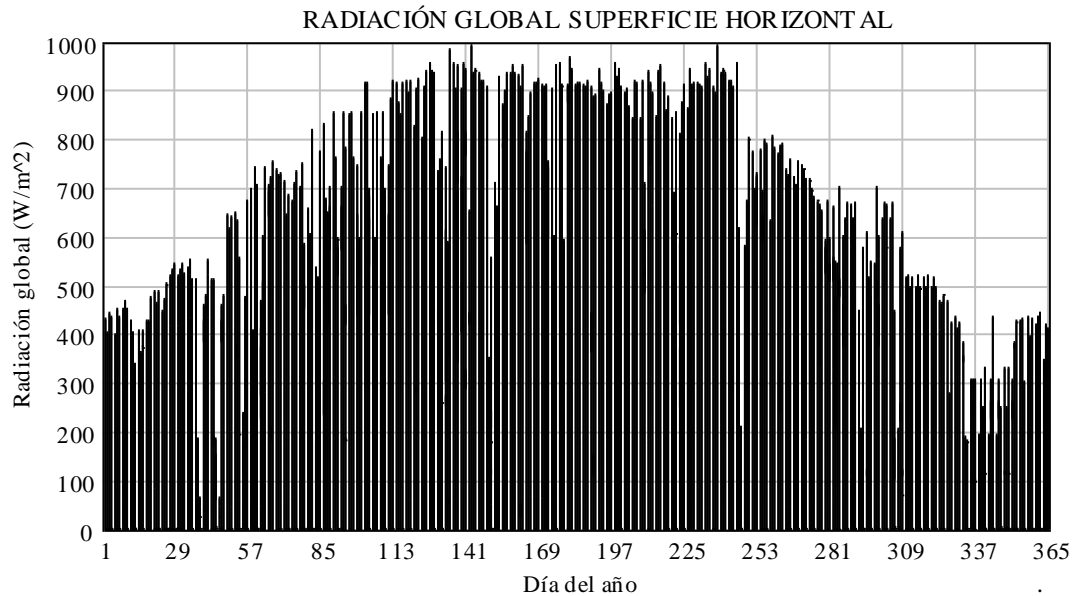
- 60.Figura 4.8 Radiación global sobre la superficie horizontal a lo largo del día.

Se puede comprobar la gran diferencia que existe entre la radiación que llega en verano (curva roja) y la que llega en invierno, (curva azul). Se observa como la radiación global en verano es muy superior a la de invierno, y en medio se encuentran las estaciones de primavera y otoño. Pero además se debe destacar que la energía captada no depende únicamente de la radiación, sino que también depende del tiempo de exposición. Y sucede que en verano aparte de que la radiación es mayor, también lo es el tiempo de exposición, y como la energía es la integral de la radiación a lo largo del tiempo, es decir, el área bajo las curvas de radiación, se comprueba como en invierno llega mucha menos energía en forma de radiación. Este gráfico se puede complementar con la figura 4.6, donde se observaba cómo la duración del día (DD) pasaba de 9 horas en invierno a 15 horas en verano.

En la siguiente figura se observa la radiación solar a lo largo del año. Se puede comprobar cómo en verano la radiación es muy superior a la que llega en invierno, incluso hay días en los que esta relación se dobla.

Se puede observar que la máxima radiación que se da en un día es de 1000 W/m^2 y la simulación se ha realizado con unas condiciones de contorno de 1000 W/m^2 para la placa absorbidora, luego el objetivo será obtener un valor más cercano al que se puede dar en un día soleado para cada inclinación simulada: (15° , 30° y 45°).

4. El papel de la radiación solar



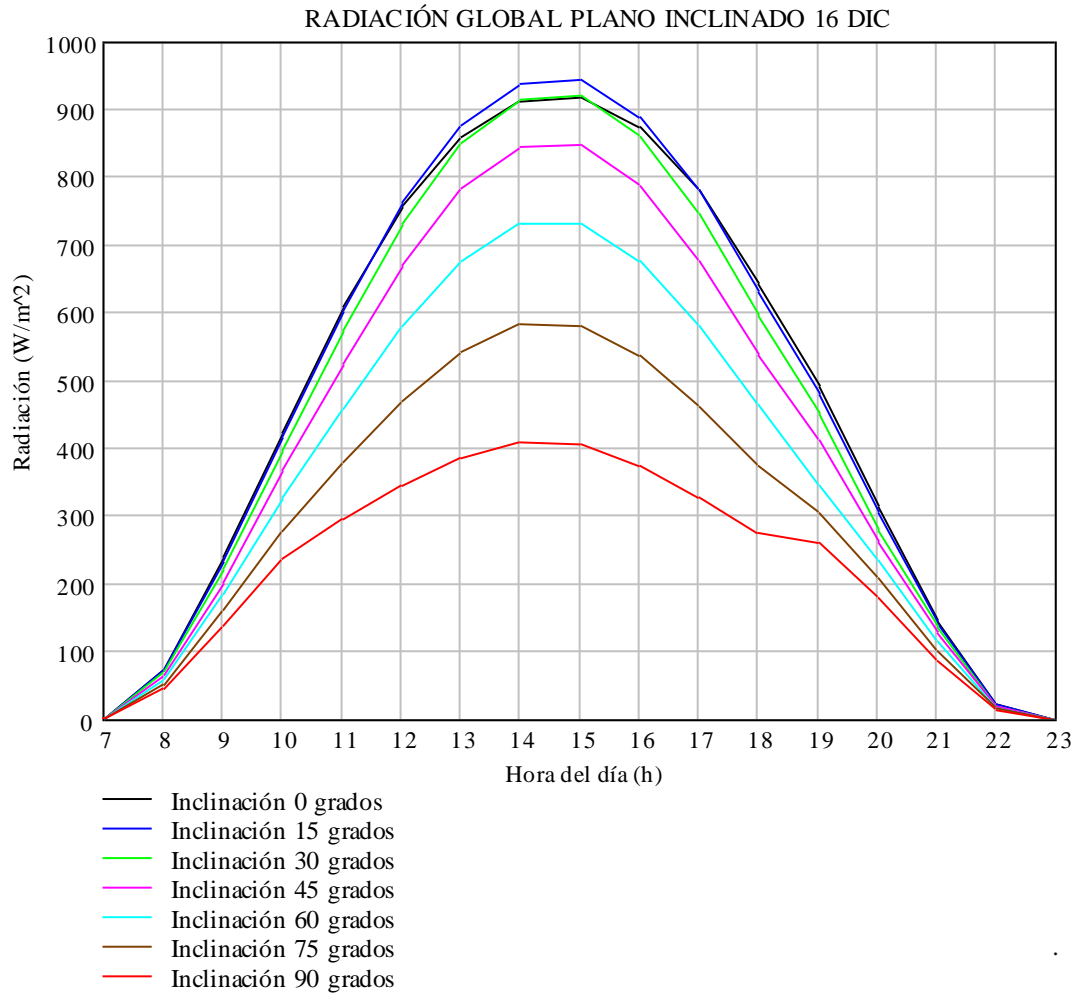
- 61.Figura 4.9 Radiación global sobre la superficie horizontal a lo largo del año.

4.2.1.2 RADIACIÓN SOLAR SOBRE UN PLANO INCLINADO

El objetivo de este apartado es el de corregir la radiación solar que incide sobre una superficie horizontal en Leganés para poder hacer experimentos sobre un plano con una cierta inclinación (β).

En las siguientes figuras se va a observar cómo la inclinación del captador solar resulta de vital importancia a la hora de recibir la irradiación térmica. También se comparará la radiación térmica que se puede recibir en un día soleado de verano con la que se recibe en un día soleado de invierno.

4. El papel de la radiación solar



- 62.Figura 4.10 Influencia de la inclinación sobre la radiación durante un día de verano (16 de Junio).

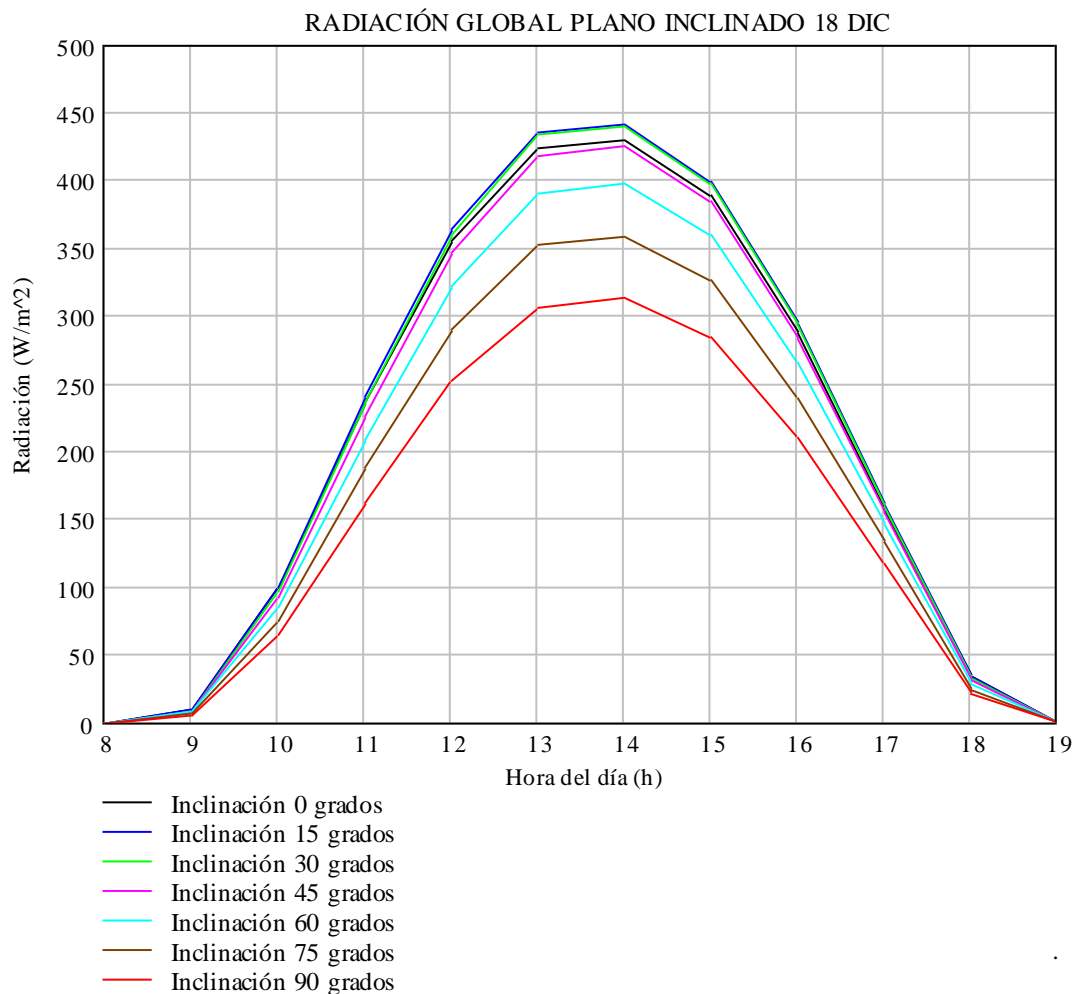
La figura 4.10 muestra en línea negra la radiación que llega a una superficie horizontal. Si esta superficie se inclina un ángulo pequeño hacia el Sur, por ejemplo 15° (línea azul) la radiación que incide es superior. Pero al inclinar un poco más (línea verde, 30°) la radiación incidente pasa a valer menos. Luego parece que existe una inclinación óptima cercana a los 15°. Puede ser calculada como la diferencia entre la latitud del lugar y la declinación. Dicha inclinación óptima variará diariamente para un lugar determinado. Se puede calcular la inclinación óptima de una superficie situada en Leganés para el día seleccionado (16 de Junio) como:

$$\beta_{16\text{ jun}} = \phi - \delta_{16\text{ jun}} = 40,19 - 24,25 = 15,94^\circ$$

Este valor coincide con lo esperado mirando la figura 4.10, ya que a partir de la inclinación de 15°, las siguientes inclinaciones van haciendo disminuir la radiación incidente.

4. El papel de la radiación solar

A continuación se va a estudiar el mismo gráfico pero para un día soleado de invierno, por ejemplo el 18 de diciembre, y se obtendrán curvas similares:



- 63.Figura 4.11 Influencia de la inclinación sobre la radiación global durante un día de invierno (18 de Diciembre).

La diferencia principal que existe en invierno respecto a lo que sucede en verano es que la declinación es menor, llegando a valores negativos, luego la inclinación óptima será superior. El ángulo óptimo para el día 18 de diciembre se podrá calcular del siguiente modo:

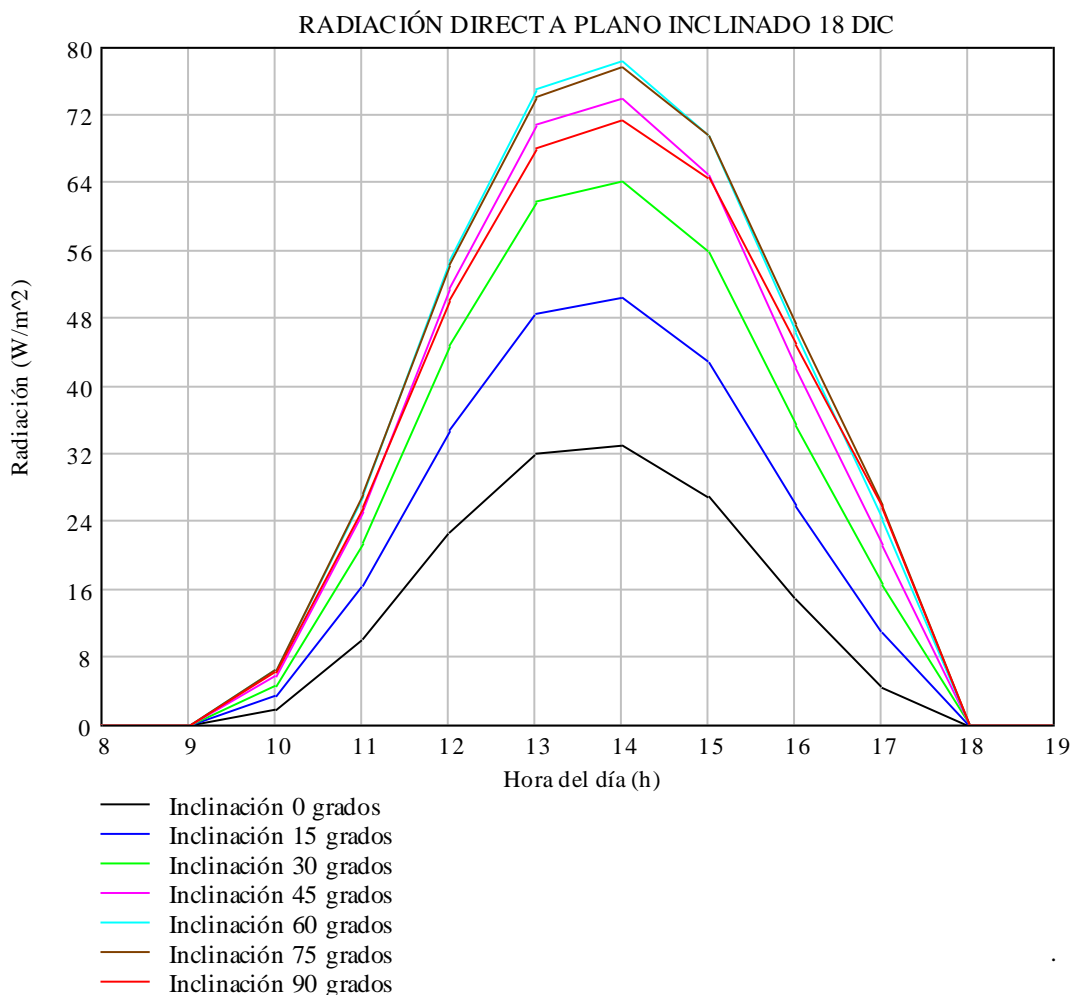
$$\beta_{18dic} = \phi - \delta_{18dic} = 40,19 - (-24,32) = 64,51^\circ$$

El ángulo óptimo resulta ser bastante grande. Y parece no obedecer a la figura 4.11 ya que la inclinación óptima está entre 30 y 45°. Este hecho se puede explicar del siguiente modo: la radiación que es óptima a un ángulo de 64.51° es la radiación directa. Sin

4. El papel de la radiación solar

embargo, la radiación sobre la superficie inclinada cuenta con otros dos sumandos, la radiación difusa y la reflejada. A medida que se aumenta la inclinación de la superficie disminuye el factor de visión del cielo y aumenta el del suelo, disminuyendo el factor multiplicador de la radiación difusa que resulta ser más importante y aumentando el de la reflejada que cuenta con un valor inferior, de modo que la suma de ambas se reduce, reduciéndose el valor de la radiación global sobre la superficie inclinada, motivo por el cual el ángulo óptimo para la radiación global es inferior al de la radiación directa. En el caso del día de verano no se apreciaba esta influencia dado que, al contar con un ángulo de inclinación óptimo bajo, la disminución de la suma de radiación difusa y reflejada hasta este punto era inferior a la mejora de la radiación directa.

Para comprobar este efecto se puede graficar la radiación directa para distintas inclinaciones durante el mismo día de invierno.



- 64.Figura 4.12 Influencia de la inclinación sobre la radiación directa durante un día de invierno (18 de Diciembre).

4. El papel de la radiación solar

En esta figura si se aprecia como el ángulo óptimo, el que proporciona una mayor cantidad de radiación es el de 60°, como se había calculado anteriormente. Otro dato curioso es que se obtiene más radiación directa en un plano colocado a 90° que en uno horizontal. Es lógico por otra parte, ya que el ángulo óptimo para radiación directa es de 64.51°, más próximo a 90° que a 0.

4.2.1.3 ENERGÍA Y RENDIMIENTO DE LOS CAPTADORES A 15, 30 y 45° TENEINDO EN CUENTA LOS MOVIMIENTOS DEL SOL.

En el apartado 3.2.1 se obtuvo la siguiente tabla:

Inclinación	Calor útil (W)	Rendimiento (%)
15°	314.84	83.95
30°	313.80	83.68
45°	338.57	90.28

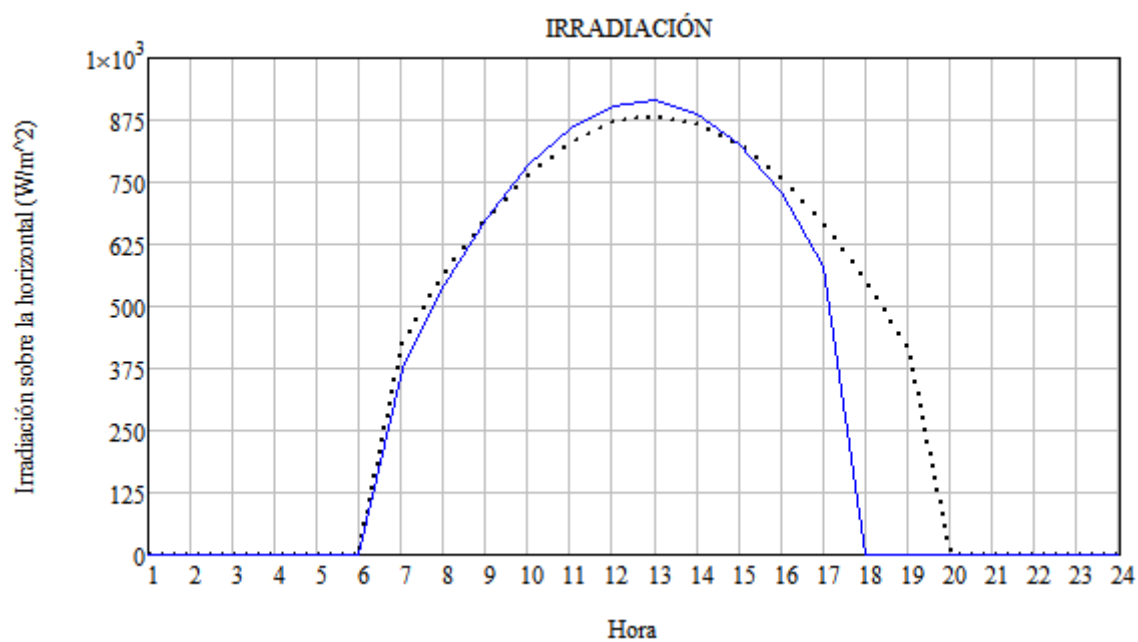
Tabla 12: 3.7 Calor útil y rendimiento para la malla refinada de las 3 configuraciones.

Se debe destacar que la tabla se obtuvo con valores fijos de radiación, es decir, la simulación realizada en Fluent, se realizó con un valor de 1000 W/m² para las 3 inclinaciones. Sin embargo, se ha comprobado como para cada inclinación existe un ángulo de inclinación que maximiza la radiación que le llega al captador.

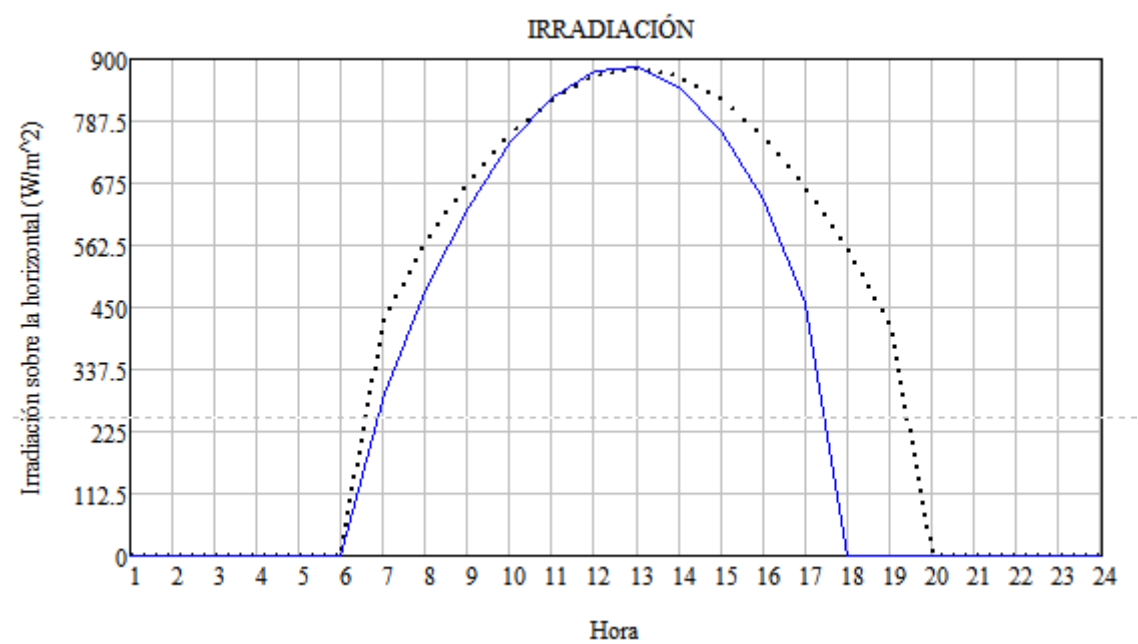
En este punto se comparará la irradiación que pueden alcanzar los captadores solares, y se realizarán simulaciones en Fluent para volver a obtener una tabla más realista que la que se obtuvo en el apartado 3.2.1.

En las siguientes figuras se obtendrá un valor máximo de irradiación para las 3 inclinaciones, primero para la de 15°, luego para la de 30° y finalmente la de 45° para un día soleado de verano, concretamente para el día 16 de junio:

4. El papel de la radiación solar

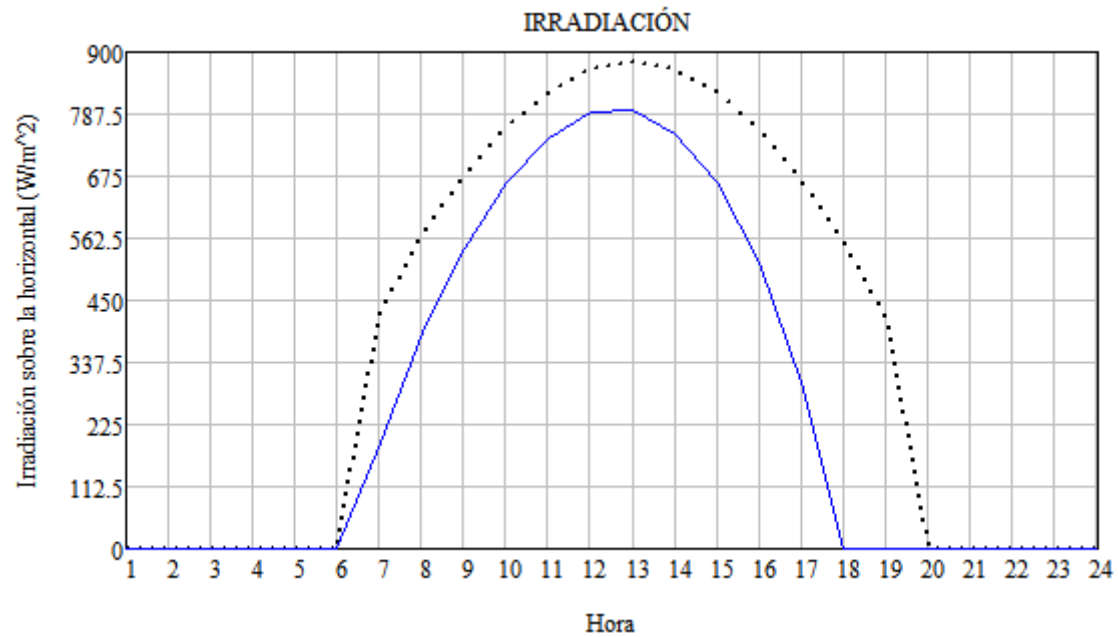


- 65.Figura 4.13 Irradiación en el plano horizontal (punteado en negro) vs inclinación 15° en azul.



- 66.Figura 4.14 Irradiación en el plano horizontal (punteado en negro) vs inclinación 30° en azul.

4. El papel de la radiación solar



- 67.Figura 4.15 Irradiación en el plano horizontal (punteado en negro) vs inclinación 45° en azul.

Observando las figuras 4.13, 4.14 y 4.15, el valor máximo obtenido para la inclinación de 15° es de 915 W/m², el valor máximo para la inclinación de 30° es de 875 W/m² y finalmente el valor máximo para la inclinación de 45° es de 790 W/m².

Con estos valores se procede a simular en Fluent los 3 casos con las 3 diferentes irradiaciones, y se obtiene los siguientes datos, que se pueden observar en la tabla:

Inclinación	Irradiación máxima (W/m ²)	Velocidad de salida (m/s)	Temperatura de salida (K)	Calor útil (W) (Ecuación 2.3)	Rendimiento (Ecuación 2.4)
15°	915	0.4868	376.94	287.29	0.8372
30°	875	0.5727	359.68	273.52	0.8335
45°	790	0.6188	359.94	275.57	0.9302

Tabla 13: 4.4 Calor útil y rendimiento para la malla refinada para las 3 configuraciones.

La tabla muestra resultados muy interesantes. Si nos centramos en el calor útil, la inclinación más recomendable teniendo en cuenta no solo cómo se comporta el

4. El papel de la radiación solar

fluido, sino además teniendo en cuenta la irradiación solar para un día de verano es la de 15° , ya que se obtiene el valor más elevado de calor útil.

Si lo que realmente nos preocupa el rendimiento de la instalación, se elegirá la inclinación de 45° , ya que obtiene un rendimiento del 93%, en lugar de un rendimiento del 83% que obtienen la instalación para una inclinación de 15° y de 30° . Sin embargo, este valor no es tan importante, porque el rendimiento se calcula con la ecuación 2.2, y en el denominador se tiene el producto de irradiación solar por área irradiada. Y no se le suma un término de potencia generado por un aporte auxiliar, como puede ser la colocación de una caldera. De este modo, lo que hay en el denominador es un término que no nos cuesta dinero, puesto que los rayos solares pueden ser utilizados de manera gratuita para la obtención de energía. En este caso, resulta más importante la penúltima columna donde se comparan los valores obtenidos de potencia térmica utilizable en la cámara de secado que se colocara a continuación del captador solar. De este modo, la configuración más recomendable será la de colocar el captador con una inclinación de 15° y a continuación colocar la cámara de secado. Si nos fijamos en la tabla 4.4, la potencia obtenida para 45° era superior que la disposición de 15° , pero una vez que se tienen en cuenta los efectos que originan en la irradiación los movimientos del Sol, se llega a la conclusión que es más acertado colocar el captador con una inclinación de 15° .

5 CONCLUSIONES

Para finalizar el proyecto, se va a proceder a hacer un resumen de los datos obtenidos en todas las simulaciones realizadas en Fluent. Se debe recordar que en el proyecto se han simulado dos formas diferentes de funcionamiento del captador solar. En la primera, se ha estudiado la convección forzada, en la que se debe colocar un sistema de aporte de energía cinética al fluido, es decir, un medio de impulsión del aire, que generalmente se realiza mediante el uso de ventiladores. En la segunda, la convección natural, el medio de impulsión es la diferencia de densidades provocada por la diferencia de temperaturas en el fluido. También se ha estudiado la importancia que tiene el Sol en la obtención de energía térmica.

En el apartado 3.1, cuando se estudiaba el modelo nominal, la primera comprobación que se ha realizado es la del estudio del Reynolds, y se ha obtenido un valor que oscila en torno a 3500. Esta zona se encuentra por encima del Reynolds 2300, luego estaremos en la zona turbulenta. Pero según la literatura, no se puede asegurar que el flujo sea turbulento sin que el valor del Reynolds sea superior a 10000. Se ha simulado el modelo nominal con un modelo laminar y otro turbulento, obteniéndose valores de temperatura media en cada una de las 15 divisiones del captador semejantes, con una diferencia de menos del 0.05%, luego se concluye que el estudio del modelo nominal se puede realizar eligiendo un modelo turbulento, pero también si se ha elegido uno laminar.

El siguiente paso es comprobar si el modelo simulado también cumple el balance de masas. Para ello el gasto másico que circula en cada una de las 15 divisiones del modelo debe ser igual. Se debe cumplir la ecuación (3.3) y se concluye que en todas las divisiones pasan los mismo kg aire/segundo salvo un error del 4.8%.

En este mismo apartado se comprueba cómo se sigue la ecuación (3.8) que predice la temperatura media de salida del captador si se conoce la temperatura de entrada, el calor suministrado al fluido, el gasto másico y el calor específico del aire. Comparando la temperatura de salida al hacer un balance energético y el que se obtiene haciendo la simulación en Fluent, se obtiene un error del 0.48 %, es decir, que el modelo simulado cumple el balance de energía.

A continuación se realizará una conclusión del modelo en convección forzada (apartado 3.1) y el de convección natural (apartado 3.2).

Lo primero que se ha comprobado en el modelo que simula el captador solar con convección forzada es que la inclinación no es relevante a la hora de obtener los resultados finales. Es decir, si se simula el modelo con una inclinación de 0°, y después se hace lo propio para una inclinación de 15°, los resultados obtenidos son idénticos. Se debe a que en este caso las velocidades que se han elegido, contribuyen de manera más importante que los movimientos que se producen por diferencia de densidades.

5. Conclusiones

En el apartado 3.1.1 se ha comprobado que al aumentar la velocidad de entrada del fluido, se consiguen menores temperaturas de salida de la corriente. Además estas temperaturas son semejantes a las que se obtiene aplicando un balance de energía salvo errores del 0.83%, y tiene una dependencia lineal, cumpliéndose de este modo el balance energético.

En el siguiente apartado, el 3.1.2 se ha estudiado el papel que tiene la variación del flujo de calor en la corriente, pasando de 250 W/m^2 a 1250 W/m^2 sumando en cada simulación 250 W/m^2 . Para las 5 simulaciones se obtiene temperaturas de salida mayores cada vez que se aumenta el flujo de calor. Si se comparan con la temperatura de salida que se obtiene haciendo una balance energético se obtiene un error máximo del 0.59%. Cabe destacar que las irradiaciones de 1000 W/m^2 y 1250 W/m^2 son bastante elevadas y normalmente no se obtienen para nuestra latitud, salvo en algún día soleado de verano. Sin embargo pueden ser alcanzadas en otras latitudes durante varios días seguidos, y por ello se estudian. Se puede comprobar como la temperatura media en cada una de las 15 regiones en las que se divide el captador solar sigue una distribución lineal, como predecía la ecuación 3.8 que salía del balance de energía.

El siguiente apartado, el 3.1.3, ha sido importante para estudiar la geometría del captador solar, estudiando una separación vertical entre placas de 18 mm, 30 mm y 44 mm. Para 18 mm se obtiene un error en la temperatura de salida del 6.4 %, y se comprueba que el error se va haciendo más pequeño a medida que la distancia entre placas aumenta, 0.48 % y 0.42 % respectivamente. Esto indica que el modelo es más preciso cuanto más gasto másico de aire pase, es decir, cuando el área de paso del fluido sea mayor. Además se cumple la dependencia lineal de la temperatura, es decir, la temperatura media va aumentando a medida que el aire pasa más tiempo en el fluido, alcanzándose el máximo a la salida del captador, como predice el balance energético.

En el apartado 3.1.4 se ha comprobado la importancia del número de nodos en la malla para realizar el balance energético. Se ha comprobado, que tanto la malla gruesa de 27482 nodos como la fina de 199563 nodos dan temperaturas muy cercanas, con un error del 0.04 %. Luego se concluye que el refinado de la malla no es necesario para hacer cumplir el balance de energía. Esto no quiere decir que no sea necesario hacerlo, ya que cuantos más nodos tenga la malla se obtendrán valores más precisos en parámetros tan importantes como la temperatura puntual, densidad puntual, velocidad puntual de cada partícula, etc.

En el apartado 3.2, se ha realizado el estudio de la convección natural o convección libre. Este modelo ha sido más difícil de convergir y ha sido más difícil de estudiar debido a las oscilaciones que se han observado en los diferentes parámetros. Además se ha comprobado como la inclinación elegida en el captador solar resulta sumamente importante en la obtención de los resultados. Se han obtenido 6 graficas de temperaturas puntuales y 6 de velocidades puntuales, de modo que se pueda apreciar la

5. Conclusiones

evolución del perfil de temperaturas y velocidades para cada inclinación (15°, 30° y 45°) observándose las diferencias a simple vista.

En el siguiente apartado, el 3.2.1 se han comparado distintos parámetros para las 3 inclinaciones estudiadas. Se ha comprobado como la temperatura de salida más alta se da para el colector inclinado 15°, siguiendo el colector colocado a 30° y la temperatura más baja es para una inclinación de 45°. Se debe a que el aire pasa más tiempo en el captador si la inclinación es menor, y por tanto tendrá más tiempo para calentarse. El caso más extremo sería colocar el captador a 90°, es decir, perpendicular al suelo. De este modo la temperatura de salida sería baja, ya que por diferencia de densidades el fluido caliente ascendería de manera rápida y el fluido no alcanzaría una temperatura tan elevada.

Otro parámetro estudiado ha sido la velocidad de salida de la corriente de aire. La velocidad de salida mayor se produce para 45°, seguido de 30° y por último la velocidad de salida menor se ha conseguido para una inclinación de 15°. Este resultado nos indica que existe en la ecuación de la potencia térmica (2.3) un factor que es el gasto másico proporcional a la velocidad que contribuye a aumentar la potencia térmica y otro factor, que es la temperatura de salida de la corriente que es otro factor que hace aumentar la potencia (el factor es la resta de temperatura de salida menos temperatura de entrada). Y se comprueba que para cada inclinación, si se tiene una velocidad de salida elevada, se tiene una temperatura de salida baja) y al revés. Luego se debe calcular la potencia térmica en cada inclinación.

De este modo se concluye que la potencia térmica transferida a la corriente de aire es mayor para una inclinación de 45°, con un rendimiento mayor (puesto que para todas las inclinaciones se ha elegido una irradiación de 1000 W/m²).

Finalmente, en el apartado 4.2.1.3 se ha estudiado el caso simulado en el que nos encontramos en un día cercano al solsticio de verano (21 de junio en el Hemisferio Norte). La simulación se ha realizado para el día 16 de junio. Se ha elegido este día porque en Leganés fue un día despejado. Los resultados obtenidos muestran que la inclinación óptima sería la de 15°, debido a que se capta una potencia térmica superior a si el colector se coloca con una inclinación de 30° o de 45°. La potencia térmica captada es de 287.29 W. dicha potencia térmica debe ser transmitida de manera eficiente al fluido, y esta conversión tiene un rendimiento que se puede calcular sabiendo la temperatura de entrada del fluido, la temperatura de salida, la velocidad y densidad de salida de la corriente para calcular el gasto másico (puesto que el área de paso es constante) y el calor específico del aire. En la simulación se ha obtenido un rendimiento del 82.72 %.

6 BIBLIOGRAFÍA

Libros:

- Termodinámica 6º ed. Cengel, Yunus A.
- Fundamentals of heat and mass transfer, 6º ed. Incropera, Frank P.
- Principles of engineering thermodynamics: SI version 7º ed. Morán, Michael J.

Tutoriales:

- Ansys_workbench_tutorial_v.10.
- Workbench-platform-12.1.
- Wb2_help.
- Manual de construcción y operación de un secadero solar.

Tesis doctoral:

- Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos.